

CLAUDIO LOESCH

DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE IRREGULARIDADES NA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO TÊXTIL

Tese apresentada como requisito parcial
à obtenção de título de Doutor .

Curso de Engenharia de Produção e Sistemas

Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador: Ricardo Miranda Barcia, Ph. D.



UFSC-BU

FLORIANÓPOLIS

1995

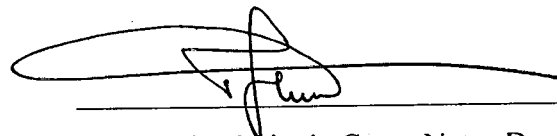
CLAUDIO LOESCH

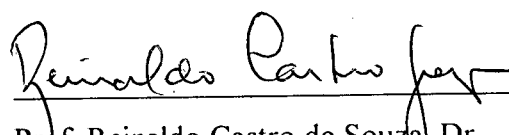
DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE IRREGULARIDADES NA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO TÊXTIL

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina, pela comissão formada pelos professores:

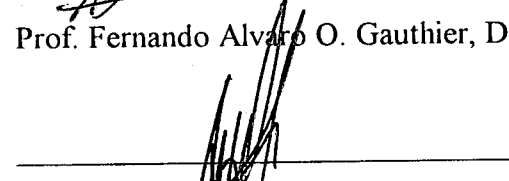
Orientador:

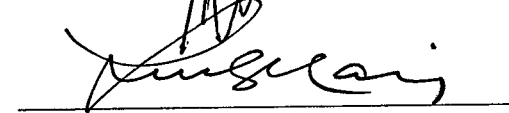


Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph. D.

Prof. Pedro Luiz da Costa Neto, Dr.

Prof. Reinaldo Castro de Souza, Dr.

Prof. Fernando Alvaro O. Gauthier, Dr.

Prof. Rogério da Bastos, Dr.

Prof. Luiz Fernando Jacinto Maia, Dr.

Florianópolis, 17 de novembro de 1995

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ricardo Miranda Barcia pela orientação no trabalho e por ajudar a encontrar as trilhas do saber. Sua contribuição foi sem dúvida imprescindível.

À minha família, por compreender que os reais motivos das privações de meu convívio para com ela, durante muitos momentos nestes anos, eram baseados nos meus ideais.

À Universidade Regional de Blumenau, pela oportunidade proporcionada: espero poder corresponder à altura.

À ACAFE, por propiciar auxílio financeiro por meio de uma bolsa de estudos.

Aos amigos e companheiros de convívio no meio acadêmico, pela inestimável amizade construída durante do transcorrer destes anos de curso.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| SUMÁRIO | iv |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE QUADROS | viii |
| LISTA DE TABELAS | viii |
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT | x |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 O CONTEXTO..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVO | 3 |
| 1.3 RECURSOS EMPREGADOS..... | 4 |
| 1.4 ROTEIRO DO DESENVOLVIMENTO..... | 5 |
| 2. A INDÚSTRIA DE FIAÇÃO TÊXTIL..... | 8 |
| 2.1 FIAÇÃO OPEN-END..... | 8 |
| 2.2 FIAÇÃO CONVENCIONAL..... | 9 |
| 2.3 ETAPAS | 9 |
| 2.4 PESQUISAS RELACIONADAS | 11 |
| 3. FUNDAMENTOS MECÂNICOS DOS EQUIPAMENTOS DA FIAÇÃO TÊXTIL...13 | |
| 3.1 MÁQUINAS, ÓRGÃOS E TRANSMISSÃO DE MOVIMENTOS | 13 |
| 3.2 COMPRIMENTO DE ONDA DO ÓRGÃO..... | 16 |
| 3.3 TÍTULO..... | 18 |
| 3.4 ESTIRAGEM | 18 |
| 3.5 EFEITOS DA ESTIRAGEM SOBRE IRREGULARIDADES PERIÓDICAS | 22 |
| 4. A REGULAMETRIA | 24 |
| 4.1 HISTÓRICO DAS ANÁLISES ELETRÔNICAS DE IRREGULARIDADES..... | 24 |
| 4.2 TÉCNICA DE ACOMPANHAMENTO DA VARIAÇÃO DA MASSA..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.1 Propriedades do Diagrama de Variação de Massa..... | 28 |
| 4.2.2 O Cálculo das Variações de Massa..... | 28 |
| 4.2.3 O Espectrograma..... | 31 |
| 4.2.4 Relevância de uma Irregularidade Detectada..... | 34 |
| 4.3 CAUSAS DAS IRREGULARIDADES E SUA DETECÇÃO..... | 34 |
| 4.3.1 Efeito Produzido por Órgãos Excêntricos e Ovais..... | 34 |
| 4.3.2 A Expressividade de Dois Picos Vizinhos no Espectrograma..... | 35 |
| 4.3.3 Encurtamento do Comprimento de Onda de Falhas Periódicas..... | 36 |
| 4.3.4 Ondas de Estiragem..... | 36 |
| 4.3.5 Ondas Periódicas Não-Senoidais..... | 38 |
| 4.4 ANÁLISE HARMÔNICA DAS ONDAS PERIÓDICAS..... | 40 |
| 4.4.1 Funções Periódicas de Irregularidade e Análise Harmônica..... | 40 |
| 4.4.2 Distribuição das Amplitudes no Espectrograma..... | 43 |
| 5. REDES NEURAI | 45 |
| 5.1 INTRODUÇÃO..... | 45 |
| 5.2 NÍVEIS DE DESCRIÇÃO ESTRUTURAL..... | 47 |
| 5.3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO..... | 49 |
| 5.4 MODELOS DE REDES NEURAI..... | 49 |
| 5.4.1 Rede Perceptron de Múltiplas Camadas..... | 49 |
| 5.4.2 Camada Competitiva Lateralmente Conectada..... | 52 |
| 5.4.3 Esquadrinhamento do Foco de Atenção..... | 54 |
| 5.4.4 MaxProd: uma Rede Discriminadora Baseada em Padrões..... | 56 |
| 5.4.5 Redes de Ligações Funcionais..... | 58 |
| 5.4.6 Pré-Processamento por Transformada de Fourier..... | 59 |
| 6. SISTEMAS ESPECIALISTAS | 62 |
| 6.1 INTRODUÇÃO..... | 62 |
| 6.2 CONVENIÊNCIA DE USO..... | 62 |
| 6.3 ESTÁGIOS PARA O DESENVOLVIMENTO..... | 63 |
| 6.4 SELEÇÃO DA FERRAMENTA ADEQUADA..... | 65 |
| 7. O SISTEMA DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE IRREGULARIDADES | 67 |

| | |
|---|------------|
| 7.1 SUBSISTEMA DETECÇÃO | 68 |
| 7.1.1 Considerações Gerais | 68 |
| 7.1.2 Seleção do Paradigma Neural..... | 71 |
| 7.1.3 Implementação Computacional..... | 74 |
| 7.2 SUBSISTEMA DIAGNÓSTICO..... | 77 |
| 7.2.1 Considerações Gerais | 77 |
| 7.2.2 Sistema Especialista de Regras de Produção..... | 79 |
| 7.2.3 Fluxograma do Subsistema | 89 |
| 8. APLICAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO..... | 92 |
| 8.1 A EMPRESA..... | 92 |
| 8.1.1 Histórico e Descrição..... | 92 |
| 8.1.2 A Maquinaria da Fiação..... | 94 |
| 8.1.3 Obtenção dos Espectrogramas Normais..... | 96 |
| 8.2 RESULTADOS ESTATÍSTICOS..... | 98 |
| 8.3 A BASE DE FATOS DO MAQUINÁRIO..... | 102 |
| 8.3.1 Cadastro Básico de Máquinas..... | 103 |
| 8.3.2 A Tabela Hash da Maquinaria..... | 104 |
| 8.4 O BANCO DE CONHECIMENTOS..... | 107 |
| 8.4.1 Metafatos e Fatos..... | 107 |
| 8.4.2 Cláusulas Prolog..... | 110 |
| 8.4.3 Regras da Base | 116 |
| 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 125 |
| 9.1 CONCLUSÕES..... | 125 |
| 9.2 RECOMENDAÇÕES | 127 |
| ANEXO I - PLANO DE ÓRGÃOS DE UM FILATÓRIO..... | 129 |
| ANEXO II - SINTAXE DA LINGUAGEM SERP..... | 130 |
| ANEXO III - TABELA DE OPERADORES SERP | 133 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 134 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3-1. PARTE DO PLANO DE ÓRGÃOS DE UMA MÁQUINA | 17 |
| FIGURA 3-2. ESTIRAGEM ENTRE CILINDROS DE ENTRADA E DE SAÍDA | 19 |
| FIGURA 4-1. DETECÇÃO E REGISTRO DA VARIAÇÃO DE MASSA | 26 |
| FIGURA 4-2. DIAGRAMA DE VARIAÇÃO DE MASSA | 27 |
| FIGURA 4-3. DIAGRAMA DA IRREGULARIDADE U | 29 |
| FIGURA 4-4. ESPECTROGRAMA DE MASSA | 31 |
| FIGURA 4-5. ESPECTROGRAMA NORMAL E IDEAL DE UM FIO DE ALGODÃO | 33 |
| FIGURA 4-6. DOIS POSSÍVEIS PICOS DE ONDA PROVOCADOS POR UM CILINDRO | 35 |
| FIGURA 4-7. DOIS PICOS VIZINHOS NO ESPECTROGRAMA | 35 |
| FIGURA 4-8. ONDA DE IRREGULARIDADE DEVIDA AO ESVAZIAMENTO DE UMA BOBINA | 36 |
| FIGURA 4-9. ONDA DE ESTIRAGEM PRESENTE NUM ESPECTROGRAMA | 37 |
| FIGURA 4-10. TIPO DE FALHA, ONDA GERADA E SEU ESPECTROGRAMA | 39 |
| FIGURA 4-11. PADRÕES VARIANTES DA CLASSE DE IMPULSOS POSITIVOS E NEGATIVOS | 42 |
| FIGURA 5-1. MODELO DO ELEMENTO DE PROCESSAMENTO | 47 |
| FIGURA 5-2. UMA REDE NEURAL FEEDFORWARD | 50 |
| FIGURA 5-3. CAMADA LATERALMENTE CONECTADA | 52 |
| FIGURA 5-4. REDE COM ESQUADRINHAMENTO DO FOCO DE ATENÇÃO SELETIVA | 55 |
| FIGURA 5-5. ARQUITETURA DA REDE MAXPROD | 56 |
| FIGURA 5-6. UMA REDE DE LIGAÇÕES FUNCIONAIS | 59 |
| FIGURA 7-1 .COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DE SOLUÇÕES NEURAIIS | 74 |
| FIGURA 7-2. O SUBSISTEMA DETECÇÃO | 75 |
| FIGURA 7-3. O SUBSISTEMA DE DIAGNÓSTICO | 89 |
| FIGURA 8-1. CONVERSÃO DO CADASTRO BÁSICO DE MÁQUINAS PARA TABELA HASH | 105 |
| FIGURA 8-2. BUSCA EM ÁRVORE DESENCADEADO PELO PREDICADO ANALISE_ORGAOS | 123 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| QUADRO 1-1. ETAPAS PRODUTIVAS EM UMA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO TÊXTIL | 2 |
| QUADRO 2-1. ETAPAS NO FLUXO DE PRODUÇÃO DA FIAÇÃO OPEN-END..... | 8 |
| QUADRO 2-2 ETAPAS DO FLUXO DE PRODUÇÃO DA FIAÇÃO CONVENCIONAL | 9 |
| QUADRO 3-1. FORMAS BÁSICAS DE TRANSMISSÃO | 14 |
| QUADRO 4-1. DISTRIBUIÇÃO DOS PICOS DE UMA IRREGULARIDADE | 44 |
| QUADRO 4-2. DISTRIBUIÇÃO DA ONDA FUNDAMENTAL E SEUS HARMÔNICOS | 44 |
| QUADRO 7-1. METAFATOS ACEITOS POR SERP | 85 |
| QUADRO 7-2. EXPRESSÕES MATEMÁTICAS BÁSICAS | 86 |
| QUADRO 7-3. PREDICADOS SERP..... | 87 |
| QUADRO 8-1. CONHECIMENTO ARMAZENADO EM SEDIF | 102 |
| QUADRO 8-2. ESTRUTURA DAS CLÁUSULAS EM ARQUIVOS DESCRITORES DE MÁQUINAS..... | 103 |
| QUADRO 8-3. PREDICADOS PARA GERENCIAMENTO DA TABELA MAQUINAS | 106 |
| QUADRO 8-4. SÉRIE DE TESTES REGISTRADA PELO PREDICADO LE _SERIE..... | 111 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 4-1. FATOR PARA DETERMINAÇÃO DA ONDA DE ESTIRAGEM | 38 |
| TABELA 4-2. COEFICIENTES RELATIVOS DAS SÉRIES DE FOURIER DAS IRREGULARIDADES | 43 |
| TABELA 8-1 CLASSIFICAÇÃO DA VARIEDADE DE ALGODÃO COMPRADO | 93 |
| TABELA 8-2. CAPACIDADE PRODUTIVA INSTALADA EM 1993 | 94 |
| TABELA 8-3. CARACTERÍSTICAS DO MAQUINÁRIO EM OPERAÇÃO | 95 |
| TABELA 8-4 TÍTULOS DE SAÍDA POR MÁQUINA | 96 |
| TABELA 8-5. RELAÇÃO DOS ESPECTROGRAMAS NORMAIS NA EMPRESA-ALVO..... | 97 |
| TABELA 8-6. TESTES DE ADERÊNCIA NA DISPERSÃO DA AMPLITUDE EM ESPECTROGRAMAS | 99 |
| TABELA 8-7. TAXA DE ACERTO PERCENTUAL DOS CLASSIFICADORES NEURAIS | 101 |
| TABELA 8-8. ADEQUAÇÃO MÉDIA PARA A IRREGULARIDADE ONDA TRIANGULAR | 101 |

RESUMO

Esta tese tem por objetivo apresentar uma solução ao problema da classificação e diagnóstico de irregularidades detectadas em materiais de natureza fibrosa que ocorrem na fiação têxtil, mediante a interpretação de dados fornecidos pelo regularímetro. Um estudo de diversas propostas implementando discriminadores neurais para classificar irregularidades constatadas é apresentado, culminando com a seleção de implementações comprovadas como mais eficientes. Adicionalmente é apresentada a implementação de uma ferramenta de sistema especialista baseada em regras de produção e um banco de conhecimentos, este último objetivando a utilização de informações provenientes da etapa classificatória para inferir diagnósticos adequados. A implementação computacional da fase de detecção e classificação e da fase de diagnóstico foram realizadas de forma a constituir um sistema integrado, como proposta de solução semi-automatizada. Seu uso constitui uma ferramenta de apoio ao processo decisório do especialista têxtil em regulametria. A eficácia do sistema proposto é analisada mediante tabulações de resultados estatísticos coletados a partir de conjuntos de simulações de irregularidades sob estratificação de diversas variáveis de controle.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to present a solution to the problem of classification and diagnosis of irregularities detected in fibrous materials that occur in the textile industry, using regularimeter data interpretation. In the first place, a selection of the more efficient implementations of neural discriminators is presented, after the discussion of several different proposals. On the other hand, the implementation of an expert system tool, based upon production rules and a knowledge is presented, so that the data from the classificatory step can be used to infer adequate diagnoses. These two steps: the computational implementation of the detection and classification phase and the diagnosis phase - were made to constitute an integrated system with the proposal of a semi-automatized solution. When put to work, it will be a supporting tool to the decision-making process of the expert in regularimetry. The efficiency of the proposed system is analyzed through statistics tabulations collected from a set of simulated irregularities under stratification of several control variables.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo é dividido em quatro seções. Para estabelecer abrangência do tema proposto, será realizada uma abordagem do contexto de estudos que inicia com a apresentação da indústria têxtil, particularizando o enfoque para a atividade de fiação, e posteriormente para a regulametria praticada dentro do Laboratório de Ensaios Físicos. A segunda seção apresenta o objetivo do trabalho. A terceira seção apresenta os recursos utilizados a implementação de uma proposta de solução, e por último, será apresentado um roteiro do desenvolvimento na ordem de exposição por capítulo.

1.1 O Contexto

A indústria têxtil possui um notável parque fabril na região do Vale do Itajaí, exercendo influências significativas nos planos social e econômico no estado de Santa Catarina. Dados relativos a grandes grupos e empresas catarinenses, bem como sua importância dentro do cenário nacional podem ser encontrados em [CUN92]. O rol das maiores aponta diversas indústrias têxteis localizadas no Vale do Itajaí. Além destas, existem ainda empresas de menor porte relacionadas ao setor, como malharias, de participação significativa no mercado devido ao seu elevado número.

Os produtos da indústria têxtil, como camisas, camisetas, calças, toalhas e roupões, encontram grande linha de diversificação, atingindo a magnitude de milhares de criações, continuamente renovada, o que não ocorre com a matéria prima, que fundamentalmente utiliza o algodão e resíduos industriais.

O quadro 1-1 apresenta a relação das etapas produtivas que podem ser encontradas na indústria têxtil. Além destas, podem-se encontrar ainda as etapas de embalagem e expedição, quando for o caso de uma indústria com estrutura inteiramente verticalizada.

| Etapa | Atividade exercida |
|-------------------|--|
| 1. Fiação | Produção do fio |
| 2. Malharia | Produção da malha a partir do fio |
| 3. Beneficiamento | Tingimento, lavagem e descanso da malha |
| 4. Talharia | Corte do tecido |
| 5. Confecção | Costura do tecido talhado |
| 6. Estamparia | Estampagem sobre o tecido confeccionado, quando for o caso |

Quadro 1-1. Etapas produtivas em uma indústria de fiação têxtil

Fiação é a arte de transformar mecanicamente os materiais fibrosos, naturais ou químicos em fios. A tecnologia da fiação engloba: operações em máquinas, construções das máquinas, fluxos de produção e aproveitamento de resíduos do processo. Em resumo: a tecnologia da fiação preocupa-se em obter a máxima produtividade e o melhor índice de qualidade.

Qualidade é a chave da economia de uma nação, requisito essencial em qualquer produto. Dada a exigência cada vez mais acentuada dos consumidores em termos de qualidade do produto final - o objeto do consumo - torna-se ordem do dia às empresas avaliar os padrões de qualidade em matéria prima, material em processo e em produtos finais, eliminando as não-conformidades e adotando ações corretivas durante o desenrolar do processo de produção, num esforço de contínuo aperfeiçoamento, visando agradar o consumidor e portanto assegurar desta forma a sobrevivência e crescimento da empresa.

O controle de qualidade da fiação é realizado no *Laboratório de Ensaios Físicos*. Tem por objetivo manter o produto em processo e produto final dentro de uma certa qualidade padrão estabelecida pela própria empresa, e comparar sempre que possível com os padrões internacionais, fornecidos por empresas produtoras de instrumentos e instituições como a ASTM. O Laboratório de Ensaios Físicos deve estar equipado com os seguintes instrumentos de medição: seriplano, torcímeter, dinamômetro, pressley, micronaire, fibrógrafo, lap/meter, dobradeira, meadeira e o *regularímetro*. Enquanto os primeiros tem por finalidade obter características de qualidade mensuráveis da matéria prima, material em processo e produtos finais, com o objetivo de verificar o atendimento das conformidades, o *regularímetro* serve à área de manutenção mecânica, para a identificação e correção dos possíveis defeitos junto às máquinas, quando detectadas irregularidades no processo produtivo da fiação.

A presença do regularímetro no laboratório é fundamental, pois, além de avaliar os padrões de qualidade de material recebido, em processo e produtos finais, outro objetivo do controle da qualidade é a de tomar ações corretivas apropriadas quando desvios são notados, de acordo com o *Princípio da Prevenção* [PAR90] dentro do controle de qualidade.

A regularidade dos fios têxteis é de grande importância para o aspecto final das malhas e tecidos, bem como na eficiência de produção destes. Na análise dos fios, o termo *irregularidade* caracteriza as variações de torção, resistência, título e aparência. Estas irregularidades são geradas normalmente por órgãos defeituosos em alguma das máquinas do processo produtivo, ou ainda por regulagens defeituosas. Entende-se por *órgão* de uma máquina mecânica como qualquer peça movida e/ou motora devido aos mecanismos de transmissão de movimentos, como engrenagens, cilindros, calandras, polias e outros.

A abrangência do campo de estudos da presente tese está diretamente relacionada à regulamentação na fiação têxtil, bem como seu uso para o controle de qualidade. Mais especificamente: na interpretação do *espectrograma*, o gráfico mestre fornecido pelo regularímetro após a realização de algum teste.

1.2 Objetivo

O modo de operação atual para a detecção e diagnóstico de irregularidades na indústria da fiação têxtil envolve a seguinte sequência de atividades:

1. execução do teste ou de uma série de testes através do regularímetro;
2. obtenção dos dados resultantes dos testes e sua interpretação;
3. detectada a presença de irregularidade periódica, através da presença de picos significativos no espectrograma, o especialista na área de regulamentação procura determinar o comprimento de onda fundamental da irregularidade;
4. o especialista procura identificar a forma da onda de irregularidade cuja manifestação no espectrograma mais se assemelha à observada;
5. o especialista procura a origem da irregularidade de acordo com o material de prova colhido: máquinas por onde o material possa ter passado, de acordo com o

processo produtivo, efeitos de estiragens acumuladas e prováveis órgãos responsáveis pelas causas;

6. o especialista investiga as causas prováveis, de acordo com a possível origem da causa e de acordo com a forma de onda da irregularidade. Alguns diagnósticos são mais fáceis devido ao alto grau de identificação com as formas de manifestações de irregularidades mais típica, bem como sua origem. Com diagnósticos difíceis, normalmente a causa é estudada com base em evidências adicionais, quando presentes, e estudos de casos similares ocorridos no passado;
7. o especialista solicita ao mecânico checagem e reparo de acordo com as prováveis causas pesquisadas;
8. se constatada a causa da irregularidade, o reparo é efetuado; senão a investigação da causa prossegue até que o problema seja sanado.

O objetivo da tese é prover melhorias neste sistema de detecção e diagnóstico de irregularidades na indústria de fiação têxtil que emprega o algodão como matéria prima, de forma a automatizar sua detecção, identificar a forma da onda de irregularidade via reconhecedor de padrões treinado sobre todas possíveis circunstâncias conhecidas, procurar sua origem e investigar as causas prováveis, pelo fornecimento de um diagnóstico.

1.3 Recursos Empregados

Para atender ao objetivo, ferramentas computacionais adequadas foram desenvolvidas e implementadas. Segue uma relação de ferramentas empregadas.

- O desenvolvimento de uma biblioteca de classes de suporte às implementações de modelos de redes neurais em software, dentro da metodologia de programação orientada para objetos.
- A implementação de redes neurais em software utilizando a biblioteca de classes desenvolvida.
- O desenvolvimento de um ambiente para sistemas especialistas: a saber, uma concha de sistema especialista, contendo o motor de inferência lógica, os meca-

nismos de interação com o usuário (incluindo explanação do raciocínio) e especificação sintática da linguagem utilizada pela ferramenta.

- O desenvolvimento de uma base de conhecimentos - o sistema especialista de detecção de irregularidades na fiação.

Os principais meios de solução escolhidos são pertinentes à Inteligência Artificial, a saber, o emprego de Redes Neurais e Sistemas Especialistas, e sobre estes será centrado o desenvolvimento desta tese.

No tocante às características comuns entre as operações produtivas de fiações que se valem da fibra natural para a produção do fio, os resultados gerais desenvolvidos são portáteis, necessitando de adequação apenas a nível de especificação de conjuntos de máquinas (e seus respectivos planos de órgãos) operando no chão de fábrica da fiação, e de suas respectivas curvas de espectrogramas normais. Em grande parte, a escolha de uma indústria de porte no setor de fiação têxtil para a aplicação do sistema desenvolvido deve-se ao desafio apresentado pela complexidade do processo, bem como pelo fato de reunir grande diversificação de máquinas de fabricantes distintos, dotando o sistema especialista desenvolvido da característica de superconjunto aplicável a outras fiações.

1.4 Roteiro do Desenvolvimento

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma. Inicialmente, o problema é apresentado. Posteriormente, é feita a apresentação das ferramentas utilizadas para sua solução. Segue uma proposta de solução. Para ilustrar um exemplo de implementação da proposta, uma aplicação é apresentada. Por último, são apresentadas as conclusões do trabalho. Os capítulos são desenvolvidos de forma a seguir esta sequência. A seguir, será feita uma descrição mais detalhada do desenvolvimento por capítulos.

O capítulo 2 apresenta a indústria de fiação têxtil. Dentro deste, são destacados os dois tipos de fiação: a open-end e a convencional. As etapas produtivas de ambas são então apresentadas.

O capítulo 3 apresenta os fundamentos mecânicos dos equipamentos da fiação têxtil. Sua compreensão é fundamental para a investigação das causas de irregularidades produti-

vas detectadas. O diagnóstico pesquisa a causa baseado no conhecimento do plano de órgãos das máquinas que atuam no processo produtivo da fiação. Transmissões de movimentos entre órgãos devem ser calculadas por estarem estreitamente relacionadas ao comprimento de onda de uma irregularidade periódica. Conceitos adicionais importantes, como estiragem, são também tratados.

O capítulo 4 trata da regulametria. A detecção de irregularidades na fiação tem origem nos testes realizados pelo regularímetro, um equipamento presente no Laboratório de Ensaaios Físicos da Fiação. As saídas dos testes são apresentadas, em particular enfocando o espectrograma - um diagrama de irregularidades por comprimento de onda. Relacionado às manifestações mais comuns de irregularidades, as possíveis causas são apresentadas. Para complementar, é realizado um estudo harmônico das formas de irregularidades periódicas que podem ocorrer. Neste ponto encerra-se a descrição do problema.

O capítulo 5 inicia a descrição das ferramentas utilizadas, apresentando as redes neurais: o paradigma utilizado para propor parte da solução ao problema da detecção de irregularidades e sua classificação. É realizada uma exposição das idéias fundamentais, seguida da apresentação dos modelos de redes neurais cujo emprêgo demonstrou eficiência. Alguns modelos já são clássicos na literatura a respeito. As redes MaxProd e a rede com pré-processamento por transformada de Fourier são apresentadas como novas propostas.

O capítulo 6 inicia com uma abordagem introdutória aos sistemas especialistas. A conveniência de seu uso é apresentada, bem como os estágios necessários ao seu desenvolvimento. Devido a possibilidade de efetuar sua implementação através de uma variedade de formas, considerações são apresentadas visando selecionar uma posterior forma de implementação adequada aos propósitos.

O capítulo 7 trata da proposta de solução: o sistema de detecção e diagnóstico de irregularidades. Como o problema é tratado em duas etapas consecutivas e distintas, é feita uma divisão em dois subsistemas. O primeiro, o subsistema de detecção e classificação da irregularidade utiliza como entrada os dados transmitidos pelo regularímetro. A ferramenta fundamental para a realização desta tarefa são as redes neurais. O segundo, o subsistema de diagnóstico, utiliza as informações de irregularidades constatadas fornecidas pelo subsistema anterior e um banco de conhecimentos para, através de um sistema especialista construído, for-

necer diagnósticos adequados. Detalhes relativos à implementação computacional dos dois sistemas são também apresentados.

O capítulo 8 descreve a aplicação do sistema desenvolvido. Inicia com a apresentação da empresa. Em seguida, a descrição desce à sua fiação e posteriormente às características da maquinaria em operação na fiação. Os resultados estatísticos do subsistema de detecção e classificação de irregularidades para a presente aplicação são apresentados, de forma a permitir uma avaliação de desempenho do sistema. Posteriormente, é feita a descrição do banco de conhecimentos SEDIF desenvolvido ao subsistema de diagnóstico. Este banco é descrito em duas partes. Inicialmente, é apresentado o cadastro básico de máquinas e sua forma de armazenamento. Em seguida são apresentadas as entradas da base, cuja essência são suas regras de produção.

O capítulo 9 apresenta as conclusões e recomendações oriundas de todo desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO 2

2. A INDÚSTRIA DE FIAÇÃO TÊXTIL

De acordo com a natureza da matéria-prima empregada, existem duas espécies de fiações com características diferenciadas: a *fiação open-end* e a *fiação convencional*.

2.1 Fiação Open-End

A fiação open-end ou fiação de resíduos tem por finalidade o reaproveitamento de todos os resíduos da indústria têxtil, como: piolho da sala de abertura, resíduos das penteadeiras e aparas de malhas provenientes da talharia. Podem existir dois fluxos produtivos, de acordo com a matéria-prima utilizada: a que utiliza o fio de cor e a que utiliza o algodão cru. A descrição das etapas é feita no quadro 2-1.

| Matéria Prima Utilizada | |
|-------------------------|-------------|
| Fio de cor | Algodão cru |
| Rasgadeiras | Abridores |
| Misturadores | |
| Cardas | Cardas |
| Passadeiras | Passadeiras |
| Filatórios | Filatórios |

Quadro 2-1. Etapas no fluxo de produção da fiação open-end

Os fios que saem da open-end e que são feitos com malhas desfibradas (retalhos) são vendidos a terceiros. Servem para a fabricação de jeans, luvas, cortinas, forrações de carpetes e redes para balanço.

2.2 Fiação Convencional

Responsável por parte do abastecimento de fio da malharia, a fiação convencional inicia seu fluxo no depósito de algodão e se estende até a espulária. Trabalha com dois fluxos, um para produzir o fio penteado e outro para produzir o fio cardado.

O *fio penteado* é um fio com melhor acabamento. Exige uma fibra de bom comprimento e tipo regular e destina-se à fabricação de malhas de alto padrão. Seu custo de produção é elevado pois emprega maior número de processos e mais mão-de-obra.

O *fio cardado* é um fio com acabamento inferior. A fibra utilizada para sua fabricação não exige um bom comprimento, o mesmo acontecendo com o tipo, e destina-se à fabricação de malhas de padrão médio. Seu custo de fabricação é menor, pois na sua produção não estão incluídos os processos de reunideira, laminadeira e penteadeira.

O quadro 2-2 ilustra as etapas seguidas no fluxo produtivo da fiação convencional. O processo de produção do fio penteado segue o *sistema suíço*.

| E t a p a | | Produto | Fluxo para o fio | |
|-----------|---------------|-------------------|------------------|---------|
| Nº | Descrição | | Penteado | Cardado |
| 1 | ABRIDORES | Algodão | Sim | Sim |
| 2 | MISTURADOR | Flocos de algodão | Sim | Sim |
| 3 | BATEDORES | manta | Sim | Sim |
| 4 | CARDAS | mecha | Sim | Sim |
| 5 | REUNIDEIRAS | manta (em rolo) | Sim | Não |
| 6 | LAMINADEIRAS | rolo | Sim | Não |
| 7 | PENTEADEIRAS | mecha | Sim | Não |
| 8 | PASSADEIRAS | mecha | Sim | Sim |
| 9 | MAÇAROQUEIRAS | pavio | Sim | Sim |
| 10 | FILATÓRIOS | fio | Sim | Sim |
| 11 | ESPULARIA | cone | Sim | Sim |

Quadro 2-2 Etapas do fluxo de produção da fiação convencional

2.3 Etapas

Uma descrição mais detalhada sobre as características e equipamentos utilizados na fiação têxtil pode ser encontrada em [CAR80]. Nesta seção as etapas são resumidas.

- **Abridores e Misturadores.** Tem como finalidade abrir o fardo de algodão, transformando-o em flocos para melhor ser trabalhado. Ao mesmo tempo em que sofre a abertura vai se realizando a limpeza do material, ou seja, são extraídas as maiores e mais pesadas impurezas, denominadas piolho.
- **Batedores.** Tem por como finalidade completar a abertura e a limpeza dos flocos de algodão, iniciadas nos abridores, e, em seguida, formar a manta e, em consequência, o rolo.
- **Cardas.** São alimentadas por rolos vindos dos batedores e tem a finalidade de retirar as fibras curtas, enroladas, mortas, quebradas, neps e impurezas, que não foram eliminadas nos abridores e batedores. O produto na saída das cardas é a mecha, que será estirada nos processos seguintes.
- **Preparação e Reunideiras.** São alimentadas por mechas vindas das cardas no processo penteado normal (sistema suíço) ou no processo Schirley, e tem como finalidade reunir de 18 a 24 mechas, dando uma pequena estiragem e formando uma manta que irá formar um rolo para alimentar as laminadeiras.
- **Laminadeiras.** Tem como função regularizar a massa de fibra de algodão que vai ser penteado, ao mesmo tempo paralelizando as fibras por meio de estiragem. É realizado através da dublagem alimentada por seis rolos de mantas provenientes de reunideiras para formar um novo rolo que irá alimentar as penteadeiras.
- **Penteadeiras.** Tem por finalidade pentear a manta, isto é, retirar as fibras curtas, neps e impurezas. Esta penteagem caracteriza o fio penteado, um fio mais uniforme, mais forte, mais fino, macio, limpo e brilhante, dando como resultado a mecha que irá alimentar as passadeiras.

- **Passadeiras.** Tem por finalidade regularizar o material em peso por unidade de comprimento, corrigindo as irregularidades que as mechas vindas das cardas e penteadeiras apresentam. A regularidade é conseguida através da duplicação e das duas passagens sucessivas da matéria prima. Também ocorre a estiragem, conseguindo desta forma uma certa paralelização das fibras, as quais se deslocam umas sobre as outras. Seu produto de saída é a mecha que irá alimentar as maçarqueiras.
- **Maçarqueiras.** Tem por finalidade dar uma estiragem parcial transformando a mecha em pavo, dando uma torção inicial ao pavo (processo no qual as fibras de algodão giram sobre seu eixo, agrupando as fibras umas as outras formando um fio resistente), formando a maçaroca.
- **Filatórios.** Tem por finalidade transformar a maçaroca em fio dando a estiragem e torção definitiva, formando o fio, contínuo e resistente, com títulos variáveis. Isto é conseguido através da rotação de cilindros com determinado tipo de engrenagens. Quando a espula está cheia, é colocada em carros e transportada para a espularia.
- **Espularia.** É a última etapa do fio dentro da fiação, onde acontece o acabamento final com a parafinação e limpeza. Estas máquinas são chamadas de conicaleiras pois produzem cones de fios.

2.4 Pesquisas Relacionadas

A presente seção menciona publicações relacionadas ao presente trabalho, por sua aplicação ao setor têxtil e por utilizarem ferramentas similares: redes neurais, sistemas especialistas e ainda conjuntos difusos.

STYLIUS e outros autores, em [STY94], descrevem um sistema de controle neurodifuso para máquinas de costura inteligentes - uma concepção futurista. A idéia consiste numa rede neural de 3 camadas treinada para calcular relações difusas. A rede neural proposta apre-

senta 3 camadas. A camada de entrada, denominada de *Antecedente*, consiste de neurônios que computam as funções-membro para regras relacionadas individuais. Na camada oculta, denominada de *Regras*, os neurônios realizam a composição e a agregação de regras relacionais. Na camada de saída, denominada de *Conseqüente*, os neurônios determinam a saída de cada regra. A implementação propõe o controle de propriedades que interagem significativamente no processo de costura: a finura, a compressão, o grau de ligação, a tensão e a fricção, a diferentes velocidades, que servem como variáveis para formar expressões lingüísticas em regras relacionais difusas.

THORPE e RUSHTON, em [THO90] relatam a construção de um sistema especialista para diagnose de falhas na produção de fibras, partindo do pressuposto de que a manutenção da qualidade de um produto consistente numa planta de produção contínua depende do controle de parâmetros qualitativos críticos. Assim, essencialmente, o sistema se preocupa com o controle de processos físicos e químicos reguláveis. Seu objetivo é dirigido à manufatura de fios acrílicos. O sistema trabalha com hipóteses de falhas e a localização de sua causa na planta do processo, utilizando seleção de hipóteses e refinamento de soluções.

VACHTSEVANOS e outros, em [VAC94], apresentam aplicações de controle difuso e estatístico como uma nova estratégia para otimizar os parâmetros de controle da talharia em diferentes velocidades. O controlador global é um sistema especialista realizado como uma base de regras difusas e uma máquina de inferência apropriada. A metodologia proposta assegura uma estabilização assintótica no sistema e sugere uma possível implementação em termos de uma arquitetura de computador em paralelo.

WU e outros, em [WU_94] usam a tecnologia de redes neurais para a modelagem de superfícies decisórias em operações de retalho de vestuário. Dois modelos são investigados: uma rede neural difusa backpropagation e uma rede neural de controle difuso.

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTOS MECÂNICOS DOS EQUIPAMENTOS DA FIAÇÃO TÊXTIL

Os conceitos apresentados neste capítulo serão fundamentais para a compreensão do banco de conhecimentos para diagnóstico de irregularidades na fiação. Em sua maioria, informações mais detalhadas podem ser encontradas em [CAR80].

3.1 Máquinas, Órgãos e Transmissão de Movimentos

Toda máquina da fiação, desde a carda até o filatório, pode ser descrita através de um plano de órgãos interconectados. *Órgão* é qualquer componente básico de movimento de uma máquina. Órgãos são interconectados através de *mecanismos de transmissão de movimentos*. Por sua vez, o material em processo é conduzido por órgãos denominados de cilindros e calandras, que constituem o chamado *trem de estiragem*. Um plano de órgãos de um filatório é apresentado no Anexo I. Os órgãos e mecanismos de transmissão mais empregados estão a seguir relacionados.

- *Eixo de transmissão*. É uma barra cilíndrica, geralmente de ferro ou de aço, que se pode fazer girar com o objetivo de transmitir movimento em certa direção. Mantém a mesma velocidade angular para os órgãos a ele ligados.
- *Correia*. É um meio de transmissão utilizado para transmitir movimento de uma polia para outra, quando a correia é plana, trapezoidal ou redonda, ou de uma engrenagem para outra, quando a correia é dentada. Mantém a velocidade periférica igual.

- *Polia*. Órgão que é uma roda presa ou não a um eixo e que recebe uma correia para transmitir o movimento.
- *Roda de fricção*. São rodas que tem a sua periferia recoberta, geralmente, por couro ou borracha, e a transmissão se dá pelo contato periférico entre estes tipos de órgãos.
- *Engrenagem*. São rodas que possuem dentes que penetram nos dentes de outra engrenagem, transmitindo movimento por contato direto. De acordo com o formato dos dentes, são classificadas em: paralela, helicoidal e cônica. A engrenagem paralela pode ser ligada a outra por correia.
- *Parafuso sem-fim*. É um eixo ao redor do qual existe uma ranhura em espiral de certa extensão. A transmissão se dá entre estas ranhuras e os dentes de alguma engrenagem a ela encaixada.
- *Motor*. É o órgão responsável pela movimentação da máquina. Ponto de partida da força motriz que atinge outros órgãos diretamente ou indiretamente a ele ligados.

Além destes, podem existir outros órgãos, como a cremalheira e a roda estrela. O conhecimento do plano de órgãos de uma máquina, junto à velocidade angular do motor da mesma, permite a determinação de velocidade angular e periférica de qualquer órgão componente através do conhecimento das 3 formas básicas de transmissão de movimento entre órgãos, suas dimensões e plano de órgãos (quadro 3-1).

| Forma de Transmissão | Velocidade Angular | Velocidade Linear | Sentido da Rotação |
|--|--------------------|-------------------|----------------------------|
| Axial | igual | muda | igual |
| Periférico, por contato direto entre os órgãos | muda | igual | contrário ou perpendicular |
| Correia | muda | igual | igual |

Quadro 3-1. Formas básicas de transmissão

Será considerada a seguinte nomenclatura de símbolos para a representação das grandezas físicas associadas aos órgãos. Quando for apresentada a transmissão de movimento entre órgãos, adota-se a indexação destas medidas físicas referenciadas a cada órgão.

w = velocidade angular do órgão, em rad/s;

v = velocidade periférica, em cm/s;

n = número de dentes, em engrenagens;

R = raio do órgão, em cm;

d = diâmetro do órgão, em cm.

A equação básica que relaciona a velocidade periférica com a angular, em qualquer órgão, é dada por (3.1).

$$v = w \cdot R \quad (3.1)$$

A relação matemática para a transmissão axial entre dois órgãos A e B preserva a velocidade angular, de acordo com (3.2) enquanto que, para a transmissão periférica e por correia preserva o módulo da velocidade periférica, conforme (3.3).

$$w_A = w_B \quad (3.2)$$

$$w_A \cdot R_A = w_B \cdot R_B \quad (3.3)$$

Para engrenagens, o número de dentes é proporcional ao raio, permitindo substituir (3.3) por (3.4), equação mais empregada, devido à referência mais universalmente adotada em mencionar engrenagens de acordo com seu número de dentes.

$$w_A \cdot n_A = w_B \cdot n_B \quad (3.4)$$

Entre dois órgãos diretamente acoplados, existe um denominado de *órgão motor*, o qual transmite o movimento, e o outro é o *órgão movido*, que recebe o movimento. Numa máquina, qualquer órgão móvel que não seja o próprio motor desta, é um órgão movido de algum outro órgão que lhe transmite o movimento. Desta forma, a velocidade angular de todos os órgãos pode ser determinada pelo encadeamento de equações da forma (3.2), (3.3) e (3.4), calculadas a partir da velocidade angular do motor. Polias e cilindros podem ter sua velocidade periférica calculada por (3.1), útil para o cálculo da estiragem mecânica no trem de estiragem.

3.2 Comprimento de Onda do Órgão

Na fiação, podem-se mencionar como exemplos de possíveis causas de irregularidades periódicas no material em processo: a existência de alguma polia excêntrica, ou a existência de sujeira localizada entre um dente e outro em uma engrenagem. A primeira provoca uma irregularidade de forma senoidal, enquanto que a segunda provoca uma irregularidade com picos positivos, estes provocados por uma perturbação de curta duração que ocorre quando a sujeira passa entre o contato das engrenagens.

Não importando a causa, o fato é que uma irregularidade periódica ocorre a cada revolução do órgão causador da irregularidade, e, através de transmissões de movimentos entre os órgãos da máquina, a mesma acaba também sendo transmitida ao trem de estiragem da máquina, afetando o material em processo. Isto ocasionará uma variação periódica na distribuição de sua massa segundo um certo comprimento de onda.

Para determinar o comprimento de onda é necessário descobrir que comprimento de material em processo sai do trem de estiragem quando ocorre uma revolução completa do órgão em questão. Esta medida é denominada de *comprimento de onda do órgão*. Todo órgão acionado pelo motor da máquina possui um comprimento de onda associado que pode ser determinado através das transmissões de movimento deste até o cilindro de saída no trem de estiragem.

A figura 3-1 ilustra parte de plano hipotético de órgãos de uma máquina, envolvendo 5 engrenagens, órgãos numerados de 1 a 5, e o cilindro de saída do trem de estiragem, o órgão 6.

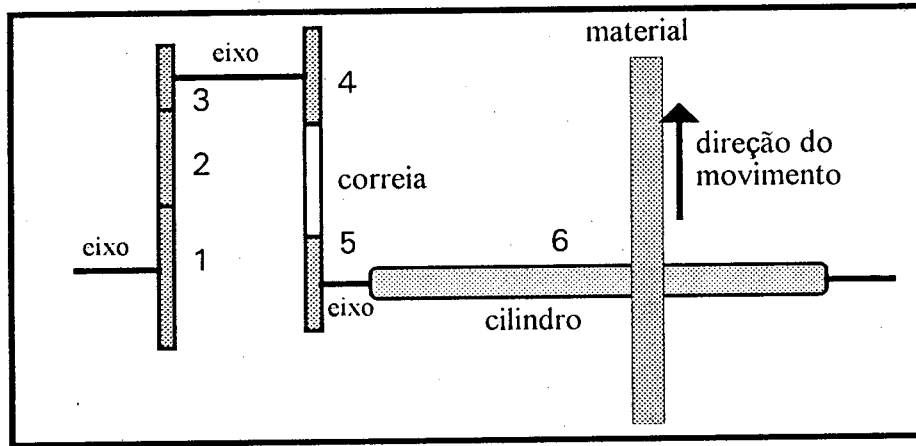


Figura 3-1. Parte do plano de órgãos de uma máquina

Considere-se, por exemplo, a determinação do comprimento de onda da engrenagem 1. As equações de transmissão de movimento determinam relações a partir das quais, é possível concluir

$$w_6 = w_1 \frac{n_1}{n_2} \frac{n_2}{n_3} \frac{n_4}{n_5}$$

que, multiplicando pelo período do órgão 1 permite obter

$$\theta_6 = 2\pi \frac{n_1}{n_2} \frac{n_2}{n_3} \frac{n_4}{n_5}$$

onde θ_6 é o ângulo de rotação sofrido pelo órgão 6, enquanto o órgão 1 efetuou uma rotação completa, correspondente a um ciclo de irregularidade transmitida ao material em processo. Como $\lambda_6 = \theta_6 (d_6 / 2)$, decorre que (3.5) fornece o comprimento de onda do órgão 6.

$$\lambda_6 = \pi d_6 \frac{n_1}{n_2} \frac{n_2}{n_3} \frac{n_4}{n_5} \quad (3.5)$$

Generalizando, quando os órgãos são engrenagens e cilindros, obtém-se a seguinte regra: *para se calcular o comprimento de onda de um órgão, multiplica-se a medida da circunferência do cilindro de saída do trem de estiragem por um produto de razões entre dentes de engrenagens, partindo do órgão considerado em direção ao cilindro de saída, entre órgãos cuja transmissão conserva a velocidade periférica*. Esta relação pode ser modificada para incluir polias, tomando-se seus diâmetros ao invés do número de dentes.

3.3 Título

Título é uma grandeza que mede a densidade linear de distribuição de massa de um material de fibras ao longo de sua extensão. Supondo que um material de fibras tenha comprimento l e massa m , seu título T é calculado por (3.6)¹.

$$T = m / l \quad (3.6)$$

Quanto menor o título, mais fino é o fio. A unidade de medida *tex* é definida por $1 \text{ tex} = 1 \text{ g} / 1000 \text{ m}$. Outras unidades de medida consideram a relação inversa, comprimento por massa, possuem unidades de medida conhecidas como o *Ne* e o *Nm*. A relação entre elas e a unidade *tex* é dada por $N_e = 590,4 / \text{tex}$ e $N_m = 1000 / \text{tex}$.

3.4 Estiragem

O material em processo, nas máquinas da fiação, segue um percurso através de um subconjunto de órgãos, denominado *trem de estiragem*. São cilindros e calandras que tem por função: limpar o material (removendo impurezas, fibras curtas, quebradas e mortas), regularizar as fibras, dar uma torção ao material e produzir uma estiragem.

¹ A equação (3.6) fornece, na realidade, o título médio. O título instantâneo seria obtido pela taxa de variação instantânea, a saber, como uma derivada dm/dl . Porém, as referências usuais são para o valor médio.

A *estiragem mecânica* é consequência de uma velocidade periférica maior no órgão de saída em relação ao órgão de entrada, que provoca um afinamento na massa de fibra, pois as mesmas são puxadas, o que as faz deslizar umas sobre as outras, distribuindo-as numa longitude de saída maior que a de entrada. Desta forma, conceitua-se a estiragem mecânica pela razão entre a velocidade periférica do órgão B de saída, com relação à velocidade periférica do órgão A de entrada (equação 3.7 e figura 3-2).

$$E_m = \frac{v_B}{v_A}, \text{ onde } v_B > v_A \quad (3.7)$$

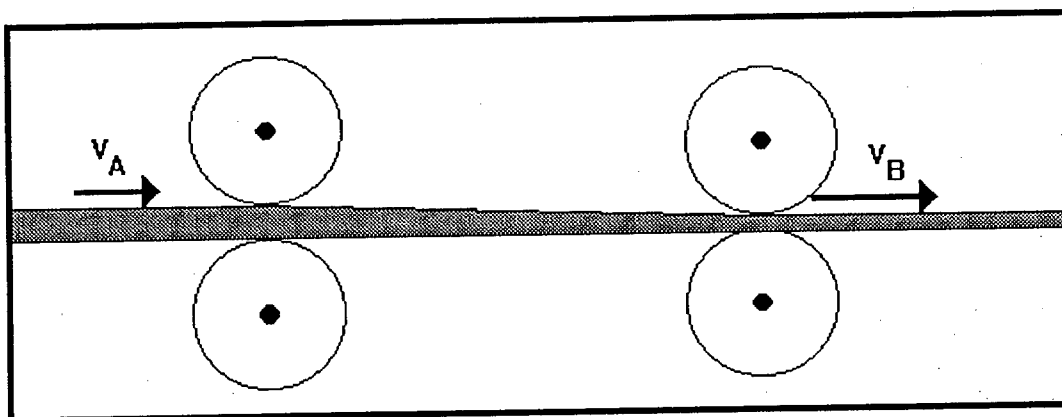


Figura 3-2. Estiragem entre cilindros de entrada e de saída

A *estiragem prática* é, por sua vez, definida pela relação entre o título de entrada e o título de saída. Se T_A é o título de entrada e T_B é o título de saída, a estiragem prática pode ser calculada por (3.8).

$$E_p = \frac{T_A}{T_B} \quad (3.8)$$

Para relacionar as duas formas de estiragem, deve ser considerada a possibilidade de haver um desperdício ou resíduo de material, o que ocorre em máquinas que efetuam limpeza no material. Seja r a massa de resíduo, e m_A , m_B , as massas de material fibroso que entram e saem após um tempo t de processo. Desta forma

$$m_B = m_A - r$$

$$E_p = \frac{T_A}{T_B} = \frac{m_A / l_A}{m_B / l_B} = \frac{m_A / (v_A \cdot t)}{m_B / (v_B \cdot t)} = \frac{m_A}{m_B} \cdot \frac{v_B}{v_A} = \frac{m_A}{m_B} \cdot E_m$$

$$E_m = E_p \cdot \frac{m_B}{m_A} = E_p \cdot \left(\frac{m_A - r}{m_A} \right) = E_p \cdot \left(1 - \frac{r}{m_A} \right)$$

onde a razão r/m_A , independente de t durante a estabilidade do processo, e apenas dependente do processo, é a *taxa de resíduo ou desperdício*. Denotando-a por δ , tem-se a relação entre as duas formas de estiragem dadas por (3.9). Em máquinas onde não há resíduo ou desperdício, as estiragens mecânica e prática serão iguais entre si, e nas demais a estiragem mecânica é inferior à prática.

$$E_m = E_p \cdot (1 - \delta) \quad (3.9)$$

Nas laminadeiras, com o objetivo de obter maior regularidade (ou homogeneidade) junto à estiragem, faz-se um *acoplamento* (também chamado de *dublagem*), que consiste em juntar D mechas iguais para produzir uma única. Desta forma, as irregularidades locais de alimentação podem se compensar e assim a estrutura se aproxima mais à estacionária, prevista pelo modelo de Martindale.

Na situação de acoplamento, a estiragem prática que substitui a equação (3.8) passa a ser a equação (3.10) onde T_A é o título de cada uma das D mechas entrantes. O afinamento é realizado escolhendo D e E_p de modo que $D > E_p$, ou seja, $T_B < T_A$.

$$E_p = \frac{T_A \cdot D}{T_B} \quad (3.10)$$

Quando o material fibroso em processo passa por diversas máquinas consecutivas, a estiragem acumulada se torna cada vez maior, como consequência de estiragens parciais devido a cada máquina do processo. Sejam n máquinas de processo sequenciais e consecutivos, $i = 1, 2, \dots, n$. Em cada máquina i seja T_{i-1} o título de entrada e T_i o título de saída. Sua estiragem prática é

$$E_{pi} = \frac{T_{i-1}}{T_i}, \quad T_{i-1} > T_i$$

de forma que, se a *estiragem prática total* for a razão entre o título de entrada na sequência, T_0 , e o título de saída T_n , tem-se (3.11), isto é, através das máquinas entre diferentes etapas do processo produtivo, a estiragem prática acumulada resulta do produto das estiragens práticas ocorridas desde o início do processo.

$$E_p = \frac{T_0}{T_n} = \prod_{i=1}^n \frac{T_{i-1}}{T_i} = \prod_{i=1}^n E_{pi} \quad (3.11)$$

Supondo, agora, que um certo comprimento l_{i-1} de matéria em processo entra na máquina i , e sai com um comprimento l_i , vale a equação (3.12) que calcula a estiragem mecânica para cada máquina i .

$$E_{mi} = \frac{v_i}{v_{i-1}} = \frac{l_i}{l_{i-1}} \quad (3.12)$$

A *estiragem mecânica total* até a máquina n é definida como a razão entre o comprimento l_n de material na saída da máquina n e o comprimento l_0 de entrada na primeira máquina do fluxo produtivo considerado. Obtém-se seu valor por (3.13), resultado do produto das estiragens mecânicas ocorridas desde o início do fluxo no processo.

$$E_m = \frac{l_n}{l_0} = \prod_{i=1}^n \frac{l_i}{l_{i-1}} = \prod_{i=1}^n E_{mi} \quad (3.13)$$

3.5 Efeitos da Estiragem sobre Irregularidades Periódicas

Esta seção justifica a importância do cálculo da estiragem acumulada. Seja um material em processo, saindo de uma máquina com uma irregularidade periódica, provocada por algum órgão defeituoso desta máquina. Se o material ainda passar por outras máquinas do processo, sofre em consequência novas estiragens. A irregularidade não desaparece: sua forma permanece e o seu comprimento de onda aumentará segundo as estiragens mecânicas ocorridas nas diversas máquinas. Substituindo o comprimento l pelo comprimento de onda λ em (3.12), obtemos (3.14), que permite calcular os novos valores do comprimento de onda da irregularidade, causados pela estiragem na máquina i .

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} \cdot E_{mi} \quad (3.14)$$

Se um ensaio com o material irregular é feito a partir de alguma amostra saída do processo posterior n , o regularímetro irá exibir a irregularidade segundo o comprimento de onda em que atualmente ela se encontra. Como o especialista não sabe de antemão a qual máquina pertence o órgão responsável pela irregularidade, mas apenas que ela foi constatada no comprimento de onda λ_n , deve considerar todas as possíveis máquinas dentro da sequência, pois o órgão responsável pode ser qualquer órgão da máquina i , $0 \leq i \leq n$, cujo comprimento de onda é λ_i . Ele pode começar sua pesquisa a partir da máquina n , procurando pelo órgão cuja onda de estiragem é λ_n , e ir regredindo calculando λ_{n-1} , λ_{n-2} , ... até chegar à carda.

Devido ao grande número de órgãos nas máquinas, e devido à existência de uma certa faixa de onda coberta pelo canal onde o pico de irregularidade se manifesta, não raro mais do que um órgão suspeito surge. A partir daí, a disponibilidade de informações adicionais, normalmente característica ao equipamento em operação, permite sua utilização a fim de diminuir o rol dos órgãos suspeitos. Desta forma, existe a possibilidade de classificar o rol de órgãos suspeitos segundo algum critério, o que envolve medidas de incerteza.

Se a irregularidade é produzida dentro de uma carda, a estiragem acumulada até a produção do fio, na saída do filatório, poderá provocar irregularidades periódicas com um

comprimento de onda além da capacidade de acompanhamento do espectrograma, e não seria assim detectado nestas circunstâncias se a análise for efetuada sobre o fio. Neste caso, um teste realizado sobre uma mecha ou um pavio reduziria o comprimento de onda desta irregularidade constatada em função de uma menor estiragem acumulada sofrida até então, portanto passando a ser detectável no espectrograma, dentro de sua faixa de abrangência.

Nenhuma irregularidade de massa tem origem na espularia, pois ao adentrar ali, o fio já pronto apenas recebe os benefícios da limpeza e parafinação.

CAPÍTULO 4

4. A REGULAMETRIA

4.1 Histórico das Análises Eletrônicas de Irregularidades

As análises eletrônicas de irregularidades já completam mais de 40 anos. Antes do advento das análises eletrônicas de irregularidades, as análises de variações de massa em fios, mechas e pavios somente podiam ser efetuadas visualmente ou mediante cortes de pedaços iguais dos mesmos, seguida por sua posterior pesagem. As variações entre os diferentes pedaços recortados eram indicados mediante um coeficiente de variação. No entanto, as possibilidades deste método eram bastante limitadas, por permitirem apenas avaliações de variação de massa sem permitir relacioná-las diretamente com todo o espectro de comprimento de onda.

Com o passar dos anos surgiram várias publicações de trabalhos teóricos referentes as análises de irregularidades. No ano de 1941, SPENCERMITH e TODD mostraram as relações entre as irregularidades teóricas alcançadas e o número de fibras por seção do conjunto de fibras. A irregularidade teórica alcançada se chama *irregularidade limite*.

No caso de uma distribuição ideal de fibras, a irregularidade limite poderia ser alcançada, mas de nenhuma maneira melhorada. No ano de 1945, MARTINDALE ampliou esta relação também para fibras com grande variação de diâmetro, como na lã. Em 1947, HUBERTY aplicou pela primeira vez o índice de irregularidade, o qual permite comparar entre si a irregularidade prática com a teórica.

Depois da segunda guerra mundial, Hans LOCHER desenvolveu o primeiro regularímetro que foi comercializado pela primeira vez no ano de 1948 pela loja Zellweger Uster. Em 1950, FIELDEN e WALKER desenvolveram um aparelho parecido.

Em 1950, FOSTER analisou as razões da irregularidade de conjuntos de fibras cortadas; em 1951 COX e TOWNSEND desenvolveram o mesmo para fibras longas. Independentemente, OLERUP e BRENY encontraram soluções para a determinação da curva de vari-

ação de longitude e em 1953, HANNAH analisou a relação entre a mesma e o espectrograma. Em 1954, GROSBURG e PALMER mostraram pela primeira vez como a curva de variação de longitude podia ser determinada por um regularímetro eletrônico e em 1955, FELIX calculou o espectrograma ideal para o conjunto de fibras. Como foi visto, entre 1940 e 1955 foram descritas as bases teóricas para a análise de irregularidade. Durante os anos seguintes os aparelhos de controles foram continuamente melhorados com relação a acuracidade e exatidão, possibilitando evoluções futuras.

Referências sistematizadas acerca de irregularidades na fiação têxtil podem ser encontradas em [BUC70], [HAT73] e [HAT75].

4.2 Técnica de Acompanhamento da Variação da Massa

A medição eletrônica das variações de massa é realizada por um sistema de regularimetria denominado *Regularímetro* - um instrumento de laboratório equipado com transdutores que detectam as variações de massa nos materiais fibrosos em processo de montagem.

Os princípios gerais de regularimetria, descrição funcional do regularímetro e seu espectrógrafo, bem como técnicas de acompanhamento de variação de massa e análises espectrográficas podem ser encontradas em [CAR80] e nos manuais de fabricante do equipamento [UST78], [UST81] e [UST89].

O regularímetro permite a determinação rápida e precisa do comprimento de onda do defeito. Apresenta, após uma análise, um relatório contendo dados estatísticos numéricos e dois tipos de gráficos: o *diagrama de massa* e o *espectrograma*. As informações contidas neste relatório constituem a base para a detecção de irregularidades. Os materiais de prova submetidos à análise de regularimetria são: (i) mechas, provenientes das cardas, penteadeiras e passadeiras; (ii) pavios, provenientes das maçarqueiras e (iii) fios provenientes dos filatórios.

O regularímetro Uster² é um aparelho eletrônico que funciona à base da variação da capacidade elétrica, medindo de modo contínuo a irregularidade dos materiais de prova. A passagem do material de prova pelo condensador de medida varia sua capacidade de acordo

² e, extensivamente, qualquer outro regularímetro. A menção ao equipamento Uster deve-se ao fato de ser o empregado na aplicação, e por deter o título de pioneira em produção de equipamentos para esta finalidade.

com a variação da constante dielétrica, a qual depende da massa momentânea do material presente. A indicação instantânea fornecida pelo condensador representa o valor médio da massa presente na extensão da armadura do condensador. Para manter acurácia maior nas medidas, é destinado um condensador a cada tipo de material de prova.

O esquema compreende dois osciladores de alta frequência que se sobrepõem: uma de frequência fixa, e outra que se modifica em razão da massa do material de prova que atravessa o condensador de medida. A variação acima ou abaixo do valor médio central da escala indica aumento ou diminuição da secção do material. O diagrama de massa não fornece indicação do valor absoluto da massa por unidade de comprimento, mas sim seu valor relativo percentual.

A variação de massa do material de prova, ou peso por unidade de comprimento dos arranjos de fibras é transformada pela unidade medidora **M** (figura 4-1) em um sinal elétrico proporcional, que será amplificado por **V** e conduzido ao transdutor do registrador **S**. O transdutor, cuja bobina é diretamente conectada a uma pena registradora, introduz movimentos de torção que representam a verdadeira reflexão das variações de massa. As variações são então registradas pela pena em um papel que corre com velocidade constante, gerando um diagrama de variação de massa.

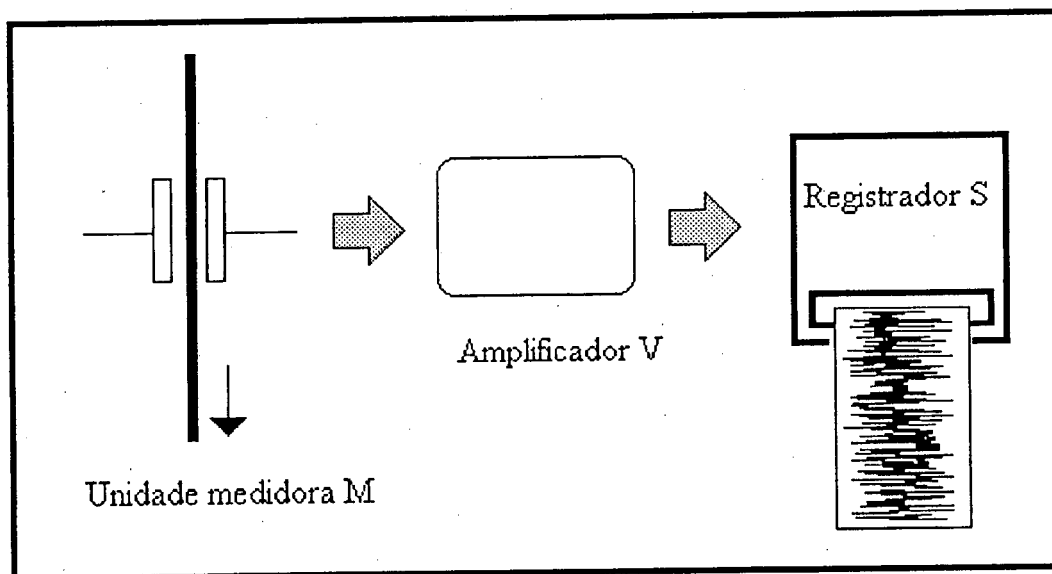


Figura 4-1. Detecção e registro da variação de massa

Na figura 4-2, observa-se que o diagrama é disposto em uma escala horizontal linear ① para o material de prova, cuja resolução é dependente da velocidade de avanço do papel e da velocidade do material de prova no teste. A escala vertical ② refere-se a variação instantânea da massa em relação ao seu valor médio, expresso em percentual.

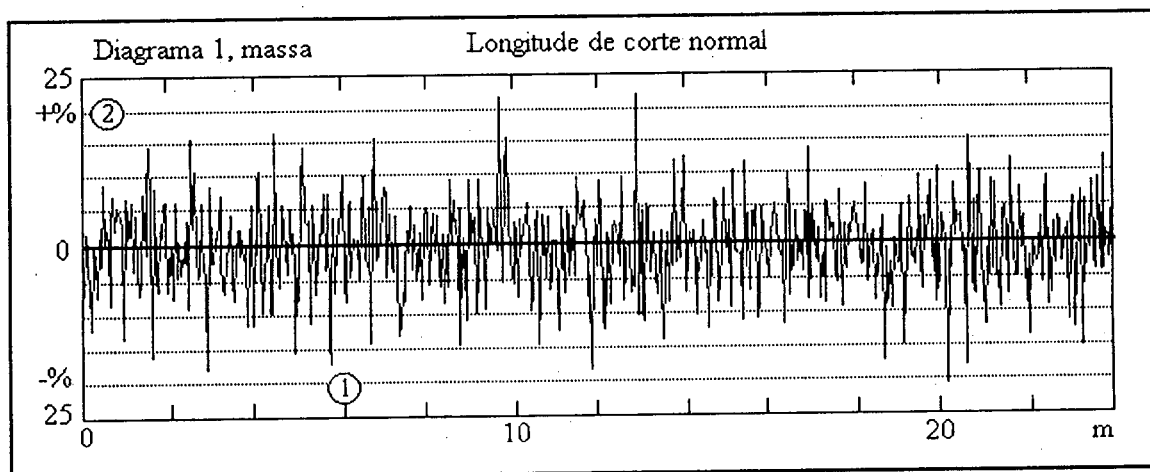


Figura 4-2. Diagrama de variação de massa

O *espectrógrafo* é um complemento do regularímetro que efetua a análise do comprimento da onda de irregularidade presente no material e grafica o espectro em um certo número de canais, gerando um gráfico denominado de *espectrograma*. A abcissa contém os canais em comprimento de onda dispostos em escala logarítmica.

Os testes são executados de forma agrupada sob a denominação de uma *série de testes*, e são realizados sobre alguns fusos amostrados de alguma máquina. Dentro do conjunto de informações selecionáveis, o regularímetro Uster Tester III permite obter:

- a finura das fibras;
- o título;
- a irregularidade U;
- o coeficiente de variação CV;
- o index = CV medido / CV teórico;
- contagem de partes delgadas e grossas;
- contagem de neps;

- título relativo = título do teste / título da série;
- espectrogramas de massa e de finura;
- diagrama de massa;
- curvas de variação de comprimento da massa e de finura.

4.2.1 Propriedades do Diagrama de Variação de Massa

O diagrama é parte extremamente importante do teste. Ele contém uma grande quantidade de informações que não podem ser fornecidas pelo espectro de comprimento de onda através da contagem das imperfeições, como o valor U/CV e a contagem das imperfeições. Destaca-se sua capacidade em acusar:

- ocorrência de eventos raros;
- variações periódicas de comprimentos de onda maiores que 40m e que portanto não podem ser verificados pelo espectrograma;
- localizações de locais grossos e finos que tendem a se dispor em grupos;
- pequenas trocas no valor médio do título;
- determinar se uma falha periódica é permanente ou se ocorre em certas porções;
- mudanças de título (se faltou uma mecha na passadeira ou se o rolo era ruim).

4.2.2 O Cálculo das Variações de Massa

O diagrama representa a verdadeira imagem da variação de massa ou peso por unidade de comprimento. É indispensável porque fornece o reconhecimento dos desvios, tendências e características mais importantes. Para uma análise completa de qualidade, entretanto, o diagrama sozinho não é suficiente. Existe a necessidade de expressar concisamente a variação da massa através de medidas representativas. Para este propósito, a estatística matemática oferece dois métodos de cálculo: a irregularidade U e o coeficiente de variação CV .

A *irregularidade* U é descrita graficamente de acordo com a figura 4-3. As variáveis referenciadas significam:

x_i = valor instantâneo da massa;

\bar{x} = valor médio;

M = massa;

T = tempo de estimação;

a = área entre os valores instantâneos x_i e o valor médio \bar{x} (área sombreada).

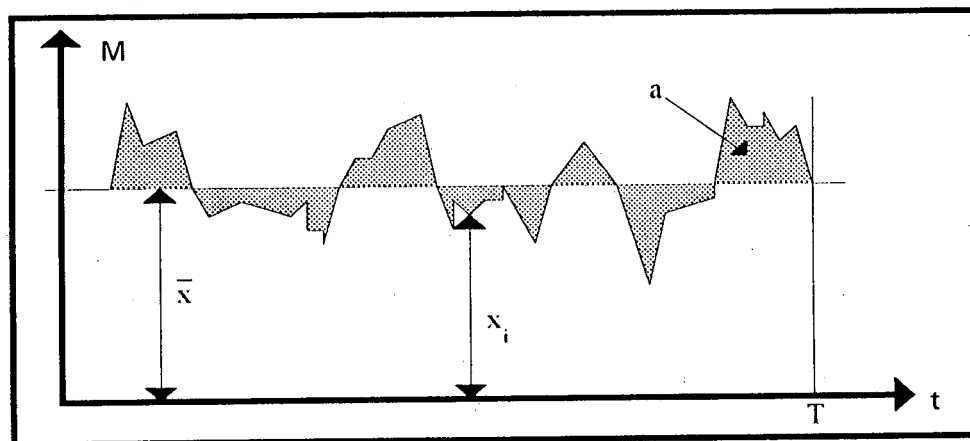


Figura 4-3. Diagrama da irregularidade U

A definição precisa de irregularidade é dada por (4.1), no caso de contagem discretizada de valores x_i , e por (4.2) no caso de aplicar-se a definição matemática para massa continuamente variável no tempo, $x = x(t)$. A irregularidade U é, portanto, proporcional à intensidade das variações de massa em torno do valor médio. Mantém-se aproximadamente independente do tempo desde que a distribuição de probabilidade da massa do material de prova não tenha seus parâmetros alterados, ou seja, caso sua homogeneidade linear se mantenha.

$$U = \frac{a}{\bar{x}T} \quad (4.1)$$

$$U = \frac{1}{\bar{x}T} \int_0^T |x - \bar{x}| dt \quad (4.2)$$

HOFFMANN descreve em [HOF73] a determinação do coeficiente de variação por meio de instrumentos eletrônicos. O *coeficiente de variação* mede a razão entre o desvio-padrão da massa em relação ao seu valor médio.

$$CV = s/\bar{x} \quad (4.3)$$

As variações de massa podem ser consideradas como se aproximando de uma distribuição normal quando a composição das fibras é homogênea, e neste caso, a relação entre ambas as medidas é dada por $CV/U = \sqrt{\pi/2} \approx 1,25$. Para distribuições bimodais e assimétricas, o fator de proporcionalidade é maior que 1,25, enquanto que para curvas simétricas porém com distribuição não-normal o fator é geralmente menor que 1,25. Falhas presentes no material de teste, como pontos grossos freqüentes, trocas instantâneas no valor médio, variações de longo comprimento de onda, fazem também com que $CV > 1,25U$ [UST89].

O coeficiente de variação CV tem recebido mais reconhecimento que a irregularidade U na estatística moderna. Isto se deve ao número cada vez maior de testes estatísticos que prescrevem o valor do coeficiente de variação para a determinação das variações de massa. Esta recomendação foi adotada pela Alemanha (DIN 53804), países do leste europeu e pela IWTO (International Wool Textile Organization).

O coeficiente de variação não é importante apenas no controle da qualidade interno, mas como elemento de comparação com produtos competitivos. Quanto menor o CV, melhor a qualidade. Assumindo a distribuição normal, para o CV, seus valores médios amostrais podem ser utilizados para efetuar testes estatísticos de comparação entre duas máquinas ou dois lotes com o mesmo instrumento de teste (empregando testes t de Student). Se os resultados U/CV são comparados com resultados obtidos com outros instrumentos ou com as estatísticas USTER, pode-se estimar intervalos de confiança e a tolerância dos equipamentos de teste instalados. Para a terceira geração de regularímetros USTER, um possível desvio de 2% deve ser levado em consideração quando se comparam resultados entre diferentes instrumentos [UST89]. Em [GRA74] são apresentados os métodos estatísticos aplicados à área da fiação têxtil.

A Zellweger Uster Company realiza periodicamente a tarefa de apresentar levantamentos completos de padrões mundiais com respeito a produtos da fiação têxtil, publicados sob o nome de "USTER Statistics". Estes apresentam dados estatísticos com respeito a:

- irregularidades em mechas, pavios e fios;

- a frequência de pontos grossos, pontos finos e neps;
- a frequência das falhas de ocorrência rara em fios;
- a resistência e alongamento dos fios; e
- a variação do título do fio.

Com estas informações, é possível o produtor de fios comparar seus produtos com os padrões mundiais para melhor poder situar seus produtos em termos de qualidade.

4.2.3 O Espectrograma

O espectrograma (figura 4-4) é uma representação da variação periódica da massa. Seu domínio é a frequência da irregularidade ou seu correspondente comprimento de onda. Esta última representação é mais prática devido ao fato de vincular-se mais diretamente ao comprimento de onda de um órgão e, portanto, mais utilizada. A ordenada apresenta o valor relativo da amplitude da irregularidade correspondente ao comprimento de onda.

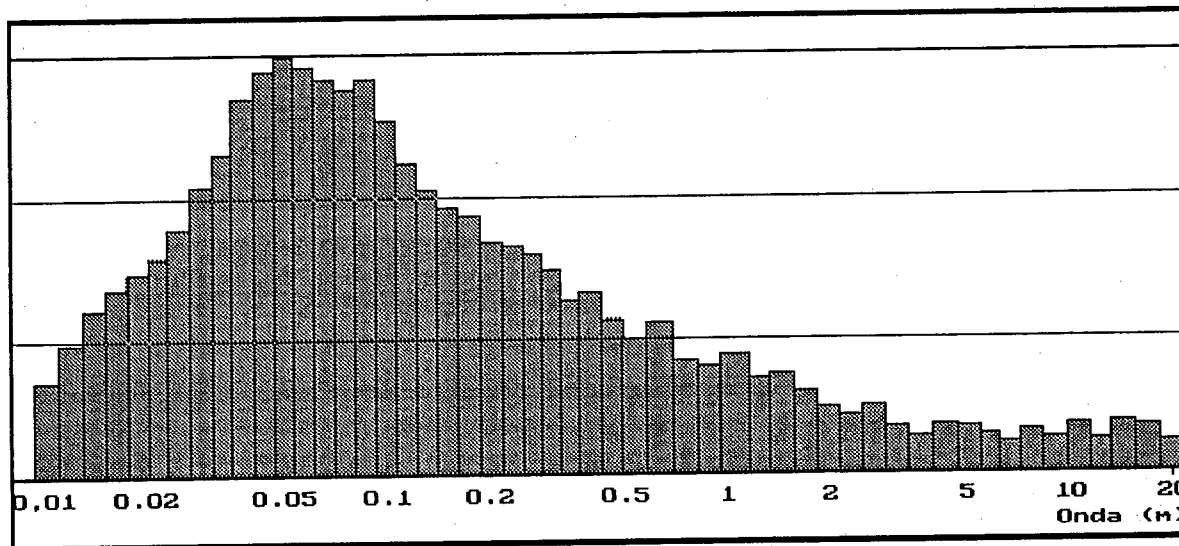


Figura 4-4. Espectrograma de massa

O gráfico é representado na forma de um histograma devido à existência de um número limitado de canais, um para cada faixa de comprimento de onda filtrado. No regularime-

tro Uster Tester III, o ponto médio da faixa de comprimento de onda em cada canal n pode ser determinado pela equação (4.4), que expressa um crescimento geométrico de razão $\sqrt[5]{2}$.

$$\lambda_n = 1,122 \times 2^{(n-1)/5} \text{ cm} \quad (4.4)$$

A representação de todos os canais é feita através de retângulos de base constante, de forma que a abcissa é representada em escala logarítmica. Isto permite ao procedimento de acompanhamento abranger, teoricamente, um vasto espectro de comprimento de onda. A existência de 90 canais no equipamento UT3 estende a análise de irregularidades para uma faixa de ondas que variam de 1 cm até mais de 2 km.

Para assegurar confiabilidade à detecção de irregularidades a comprimentos de onda mais longos, é necessário testar uma amostra que garanta uma quantidade suficiente de contagens. Isto exige material fibroso mais comprido e, portanto, testes mais demorados. O próprio equipamento assegura-se em fornecer o espectrograma com o número de canais assinalados como significativos, de acordo com o teste realizado. Contudo, situações excepcionais podem gerar necessidades de acompanhamento de testes mais demorados e abrangentes.

São as seguintes as principais vantagens do espectrograma com relação ao diagrama de massa:

- a prova de falhas periódicas no diagrama pode requerer, em muitos casos, redução drástica de velocidade de teste, enquanto que no espectrograma as falhas podem ser acompanhadas na maior velocidade de teste;
- o espectrograma permite visualizar variações periódicas de massa com clareza. No diagrama, vários tipos de falhas periódicas podem também ser reconhecidos, mas sua identificação fica muito mais difícil;
- duas ou mais irregularidades na mesma montagem de fibras dificilmente podem ser diferenciadas no diagrama, enquanto se tornam evidentes no espectrograma.

Estas vantagens justificam a importância superior do espectrograma em relação ao diagrama de variação de massa.

Uma irregularidade prática igual a zero pode ser conseguida com o nylon, por exemplo, feito de material sintético e não de fibras. Num processo de montagem por fibras, uma irregularidade zero somente poderia ser conseguida nas seguintes condições ideais: quando todas as fibras possuírem a mesma seção transversal, e o final de uma fibra estiver ligada ao início da próxima. Nestes dois casos, o espectrograma estaria assentado no eixo horizontal, isto é, a amplitude das irregularidades seria zero a qualquer comprimento de onda.

Devido ao fato de que tal distribuição de fibras não pode ser realizada sob condições práticas deve sempre ser levado em conta uma distribuição aleatória de fibras. Se a massa ao longo da montagem de fibras é examinada, então ao início de cada fibra deve haver um incremento de massa instantâneo, e ao seu fim, um decréscimo instantâneo de massa.

A disposição real das fibras assim obriga à existência de irregularidades periódicas mesmo sob condições perfeitas de funcionamento de máquinas e seus órgãos no processo de montagem das fibras. Modelos matemáticos nestas considerações reais foram desenvolvidos, dando origem a espectrogramas de irregularidade limitante abaixo dos quais é impossível ficar. Se um material fibroso alcança a irregularidade limitante, seu espectrograma será o ideal.

Sob espectro normal, entende-se, por outro lado, espectrogramas de montagens de fibras que podem ser realizadas tecnicamente livres de falhas. Não alcançam a qualidade da ideal. Experimentalmente, ficou comprovado que a razão média entre a altura do espectrograma normal e do espectrograma ideal encontra-se em torno de 1,3 [UST89], como ilustra a figura 4-5.

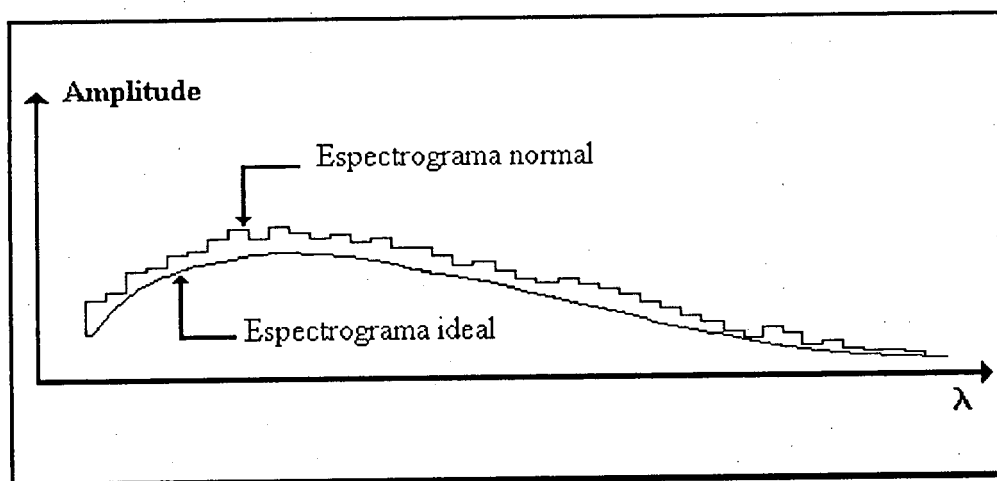


Figura 4-5. Espectrograma normal e ideal de um fio de algodão

4.2.4 Relevância de uma Irregularidade Detectada

O grau com que uma variação periódica de massa pode afetar o produto final não depende unicamente de sua intensidade, mas também da configuração do tecido produzido, da matéria-prima empregada e do título do fio empregado.

A experiência, entretanto, revelou que, baseado no espectrograma, a seguinte regra *ad hoc* pode ser aplicada. *Se a razão entre a amplitude do pico (P) e a amplitude do espectrograma normal correspondente (B) for $P/B > 0,5$, é esperado que a aparência do produto final irá ser negativamente afetada* [UST89].

4.3 Causas das Irregularidades e sua Detecção

A classificação das formas mais comuns de manifestação de irregularidades e o relacionamento às suas causas foram amplamente estudados ([BUC70] e [HAT73]). A possibilidade de relacionar as causas às suas manifestações típicas no espectrograma viabiliza o projeto de elaboração de um sistema de classificação e de diagnóstico. Esta seção apresenta as causas de irregularidades de manifestação mais comum nos espectrogramas.

4.3.1 Efeito Produzido por Órgãos Excêntricos e Ovais

Órgãos excêntricos possuem seu eixo fora do lugar. Em consequência, a cada revolução completa uma falha periódica é produzida e a variação de massa provocada terá distribuição espacial de forma senoidal.

Se, por exemplo, um rolamento de diâmetro igual à 25,4 mm for excêntrico, sua circunferência será de aproximadamente 8 cm, e assim a cada revolução completa, 8 cm do material fibroso em montagem passam por este rolamento, produzindo uma falha.

Desta forma, o espectrograma acusará uma amplitude anormal neste comprimento de onda, que se manifesta através de um pico de irregularidade singular que se eleva acima da curva normal característica (figura 4.6).

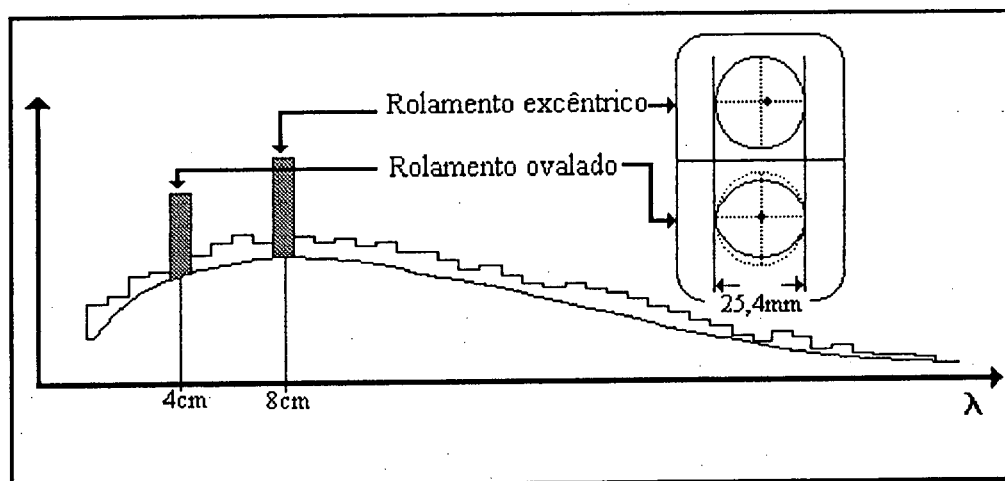


Figura 4-6. Dois possíveis picos de onda provocados por um cilindro

Órgãos de forma ovalada também causam uma falha periódica senoidal, porém a cada meia revolução. Nas considerações do exemplo anteriormente mencionado, o pico se manifestaria num comprimento de onda de 4 cm (figura 4.6).

4.3.2 A Expressividade de Dois Picos Vizinhos no Espectrograma

Como um espectrograma consiste de um número limitado de canais, pode ocorrer que uma falha periódica se estenda entre dois canais, constituindo exceção à manifestação típica de pico único. Isto significa que ambos os picos constatados em dois canais adjacentes correspondem a um pico real único, num comprimento de onda compreendido entre os comprimentos de onda representativos de ambos os canais (figura 4-7).

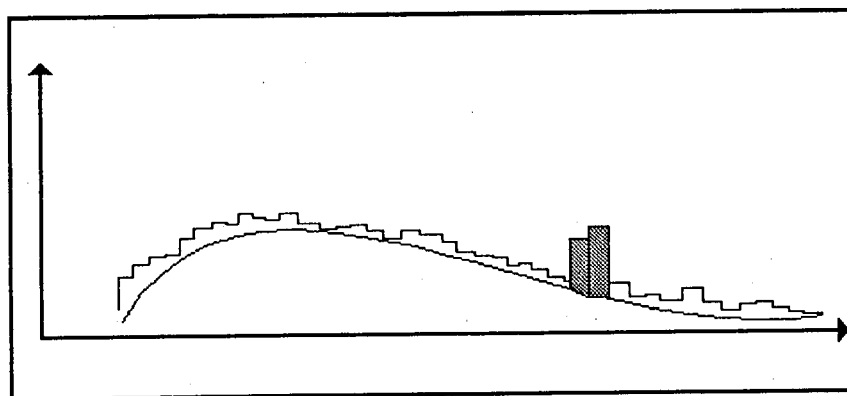


Figura 4-7. Dois picos vizinhos no espectrograma

Para oferecer um diagnóstico do efeito desta falha no produto final, os dois picos deverão ser adicionados e considerados como sendo um só.

4.3.3 Encurtamento do Comprimento de Onda de Falhas Periódicas

Excentricidades de fusos, excentricidades entre fusos e voadores na maçarqueira e bobinas de fios girando excentricamente conduzem a variações periódicas de massa cujos comprimentos de onda correspondem à circunferência do fardo sendo produzido. Os picos no espectrograma movem-se correspondentemente na direção de comprimentos de onda mais curtos na medida em que uma bobina está sendo esvaziada. Tal efeito não pode, sobretudo, ser confundido com uma onda de estiragem.

A figura 4-8 (b) mostra uma bobina de pávio com 12,5 cm de diâmetro externo, quando cheia. O diâmetro do tubo é 5 cm. Devido a uma excentricidade existente entre o voador e a bobina, com a bobina cheia um pico se manifestará numa onda de $12,5 \cdot \pi \cong 40$ cm, enquanto que a medida da onda na bobina quase esvaziada aparece a $5 \cdot \pi \cong 16$ cm. A figura 4-8 (a) mostra os dois extremos no espectrograma.

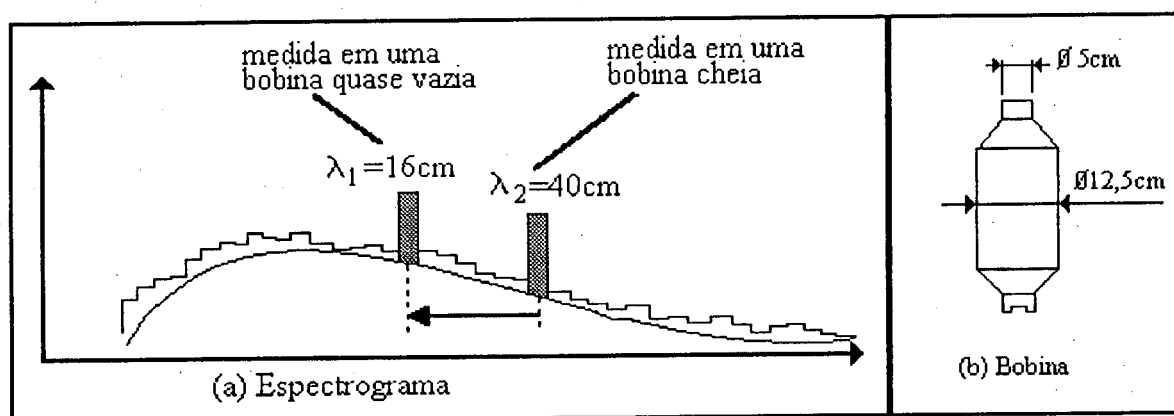


Figura 4-8. Onda de irregularidade devida ao esvaziamento de uma bobina

4.3.4 Ondas de Estiragem

Se uma variação de massa quase periódica se faz presente, ela se manifesta dentro de toda uma faixa de onda do espectrograma, conduzindo a um aumento incremental em direção ao centro da faixa, fenômeno conhecido sob o nome de onda de estiragem (figura 4-9).

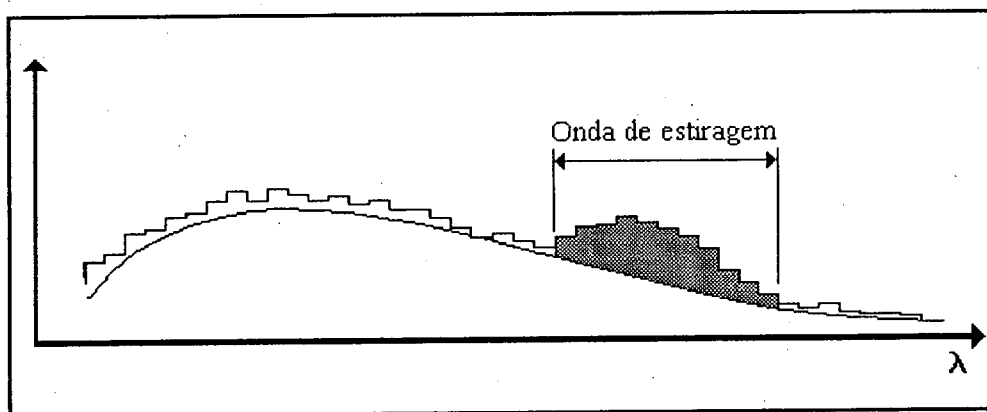


Figura 4-9. Onda de estiragem presente num espectrograma

Este grupo de falhas quase sempre ocorre na seção de escartamento, devido a um mau ajuste dos cliques, responsáveis pela pressão do escartamento. Outra causa menos frequente é o inadequado isolamento entre máquinas, de forma que possa ocorrer interferência devido as suas trepidações. Quando o material é sintético, como poliéster, a causa da estiragem pode ainda ser atribuída a oscilações praticamente periódicas dos filamentos como um resultado do fluxo do material através de tubos de ar.

Quando a causa é relacionada à seção de escartamento, numerosas medidas em materiais testados pelo fibrógrafo mostram existir regras para a correlação entre o aparecimento de ondas de estiragem e o comprimento médio da fibra. Este relacionamento pode ser expresso de forma aproximativa por (4.5)

$$\lambda \cong k.l \quad (4.5)$$

onde

λ = comprimento de onda correspondente à máxima intensidade da onda;

k = fator adimensional que depende da máquina onde a estiragem foi originada;

l = comprimento médio da fibra.

Utilizam-se para k os valores da tabela 4-1, experimentalmente determinados, de acordo com [UST89].

| Material | Origem da onda de estiragem | k |
|----------------|-----------------------------|------|
| Fio | Filatório | 2,75 |
| Pavio | Maçaroqueira | 3,50 |
| Mecha passada | Passadeira | 4,00 |
| Mecha penteada | Penteadeira | 4,00 |

Tabela 4-1. Fator para determinação da onda de estiragem

Considere-se que durante o processo da fiação uma onda de estiragem é provocada no filatório, e o fio é testado. O comprimento médio da fibra é de 2,2 cm. Neste caso, a onda de estiragem manifesta sua intensidade máxima em $\lambda \cong 2,75 \times 2,2 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$. Caso esta onda de estiragem tivesse sua origem na maçaroqueira, teríamos $\lambda \cong 3,5 \times 2,2 \text{ cm} = 7,7 \text{ cm}$ na saída da maçaroqueira. Se o filatório produz uma estiragem mecânica igual a 23,5 então a onda de estiragem provinda da maçaroqueira manifesta sua intensidade máxima em $\lambda \cong 23,5 \times 7,7 \text{ cm} = 1,8 \text{ m}$ no fio testado.

4.3.5 Ondas Periódicas Não-Senoidais

Quando aparecem vários picos no espectrograma, é necessário decidir se eles provêm de duas ou mais falhas completamente independentes, ou se eles se referem à onda fundamental e seus harmônicos de uma falha singular que gera uma onda de forma não-senoidal.

O regularímetro apresenta no espectrograma uma análise harmônica. Decompõe uma onda periódica de falhas não-senoidal de comprimento λ em uma série de componentes de comprimentos de onda λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$, ..., registrando suas amplitudes nos canais correspondentes do espectrograma. Assim, vários picos registrados no espectrograma, em locais que correspondem a λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$, ..., provavelmente referem-se à mesma onda periódica não-senoidal.

As classes mais importantes de falhas periódicas estão resumidas na figura 4-10. Nela pode-se identificar as características dos harmônicos, relacionadas à forma da onda de falha, bem como a descrição das possíveis causas atribuíveis.

A determinação das variações periódicas das irregularidades pode ser relativamente simples quando os defeitos possuem causa única, e se manifestam através de um pico de irregularidade singular no espectrograma. Todavia, a interpretação dos diagramas acaba sendo uma

tarefa difícil quando pretende-se descobrir irregularidades periódicas que se manifestam através de múltiplos picos que, além disso, podem acabar se sobrepondo.

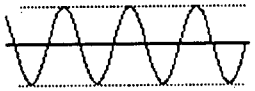
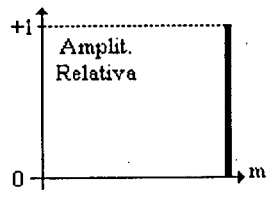
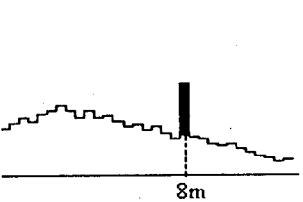
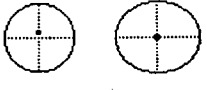
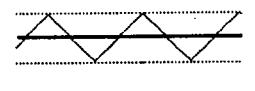
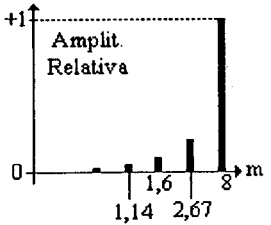
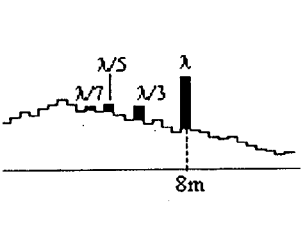
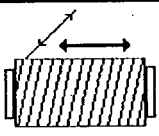
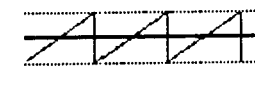
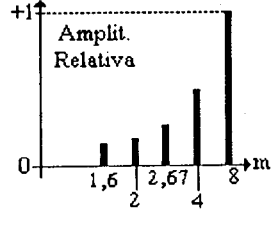
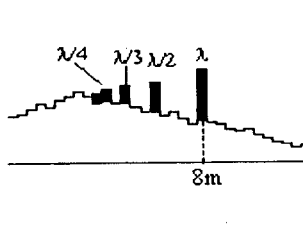
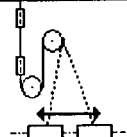
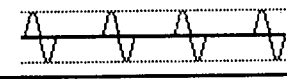
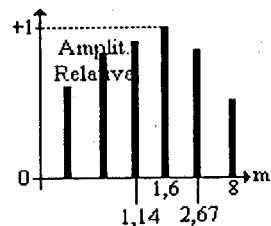
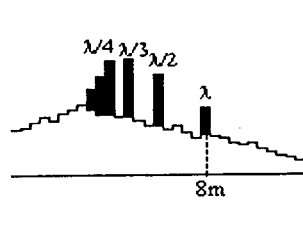

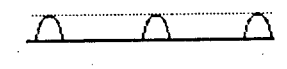
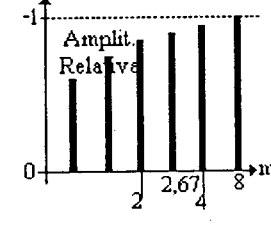
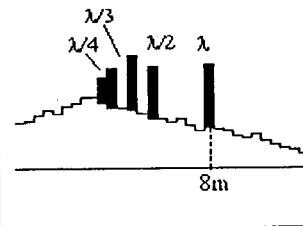
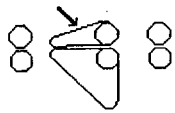
| Tipo de Irregularidade | Onda e Harmônicos | Espectrograma | Causa Atribuível |
|---|---|--|---|
| <p>Falha periódica possuindo uma forma senoidal e exibindo somente a <u>onda fundamental</u> no seu espectro de comprimento de onda.</p>  |  |  |  <p>órgão rolando excêntricamente; órgão ovalado.</p> |
| <p>Falha simétrica possuindo forma simétrica, mas não-senoidal, exibindo a <u>onda fundamental</u> e seus harmônicos ímpares.</p>  |  |  |  <p>variação de tensão simétrica do fio com movimento, reverso na bobina do filatório; sujeira/jogo de movimento dos elementos do trem de estragem</p> |
| <p>Falha simétrica possuindo forma simétrica, mas não-senoidal, exibindo a <u>onda fundamental</u> e seus harmônicos pares e ímpares.</p>  |  |  |  <p>variação de tensão assimétrica do fio com movimento, reverso na bobina do filatório; sujeira/danificação nos cilindros do trem de estragem.</p> |
| <p>Falha periódica de impulsos com partes positivas e negativas, exibindo a <u>onda fundamental</u> e seus harmônicos pares e ímpares. A onda fundamental apresenta, neste caso pico menor que os dos harmônicos.</p>  |  |  |  <p>sujeira ou poeira no eixo do rotor do filatório Open-End.</p> |
| <p>Falha periódica de impulsos com somente partes positivas ou somente partes negativas, exibindo a <u>onda fundamental</u>, assim como os seus harmônicos pares e ímpares.</p>  |  |  |  <p>defeito na junção do manchaço superior do filatório.</p> |

Figura 4-10. Tipo de falha, onda gerada e seu espectrograma

4.4 Análise Harmônica das Ondas Periódicas

Esta seção estuda em maiores detalhes a análise harmônica das ondas de irregularidade periódicas apresentadas de forma resumida na figura 4-10. O objetivo é a obtenção das amplitudes relativas entre os harmônicos e a onda fundamental, a partir da série de Fourier correspondente à função que serve de modelo matemático para a descrição da irregularidade. Estes valores serão de valia para o reconhecimento de padrões a ser utilizado.

Dado que as amplitudes dos harmônicos assumem tendência à valores decrescentes, a partir de certo ponto, devido à convergência da série infinita (4.6), apenas um número finito destas amplitudes, de magnitude mais significativa, irá manifestar-se no espectrograma quando a irregularidade está presente. Pode-se, de acordo com os valores relativos das amplitudes, mais o estudo dos canais que manifestam a onda e seus harmônicos, determinar o tamanho do agrupamento de uma irregularidade e a distribuição das amplitudes dentro do agrupamento.

Em síntese, procura-se encontrar, num vetor de excessos sobre o espectrograma normal, amplitudes devidamente posicionadas em locais que correspondam ao comprimento de onda fundamental e seus harmônicos, amplitudes proporcionais ou aproximadamente proporcionais a algum conjunto de valores teóricos, evidenciando assim a presença de irregularidade.

4.4.1 Funções Periódicas de Irregularidade e Análise Harmônica

A seção 4.3.5. apresenta os tipos de irregularidades de acordo com sua natureza funcional. As possíveis formas de onda de irregularidade provém das seguintes funções: seno, onda triangular, dente-de-serra, impulsos positivos e negativos, impulsos positivos somente e onda de estiragem. As primeiras cinco são perfeitamente periódicas, de expressões analíticas conhecidas. Esta seção apresenta as funções periódicas utilizadas na análise de irregularidades.

A expansão de uma série de Fourier para uma função $f(t)$ com domínio no tempo t , periódica e de período T , consiste em determinar, a partir de sua expressão analítica, os coeficientes da série trigonométrica (4.6) através da fórmula de Euler.

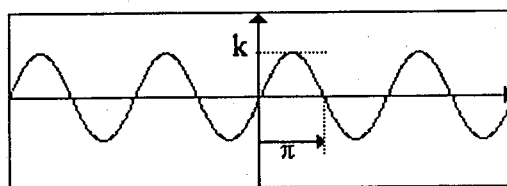
$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right) \quad (4.6)$$

Os argumentos das funções seno e cosseno, dados por $2\pi n/T$ podem ser postos na forma $2\pi/(T/n)$. Se o comprimento da onda fundamental, de período T , é λ , então o comprimento de onda associado aos harmônicos de período T/n são λ/n .

Para efeitos de simplicidade, serão consideradas as funções de ondas de irregularidade como período $T = 2\pi$, suficientes para a obtenção dos valores relativos dos coeficientes. Um simples escalamento na variável t pode facilmente generalizar as equações para períodos arbitrários, sem afetar os valores relativos dos coeficientes.

Função Seno

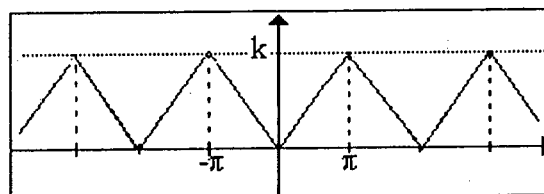
$$f(x) = k \cdot \sin x$$



Esta função não possui harmônicos, somente a onda fundamental.

Onda triangular

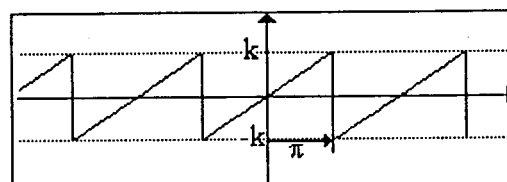
$$f(x) = \begin{cases} kx/\pi & \text{se } 0 \leq x \leq \pi \\ -kx/\pi & \text{se } -\pi \leq x \leq 0 \end{cases}$$



$$\text{Série de Fourier: } f(x) = \frac{k}{2} - \frac{4k}{\pi^2} \left(\frac{\cos x}{1^2} + \frac{\cos 3x}{3^2} + \frac{\cos 5x}{5^2} + \dots \right)$$

Dente-de-serra

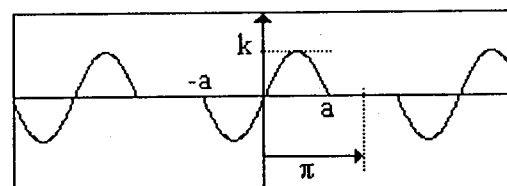
$$f(x) = \frac{k}{\pi} x \quad \text{se } -\pi \leq x \leq \pi$$



$$\text{Série de Fourier: } f(x) = \frac{2k}{\pi} \left(\frac{\sin x}{1} - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \dots + \dots \right)$$

Impulsos positivos e negativos

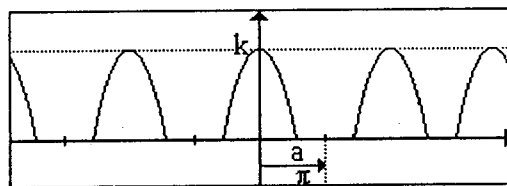
$$f(x) = \begin{cases} k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) & \text{se } -a \leq x \leq a \\ 0 & \text{se } -\pi \leq x < -a \text{ ou } a < x \leq \pi \end{cases}$$



Série de Fourier: $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx)$ onde $b_n = \frac{2ak \cdot \sin(an)}{\pi^2 - (an)^2}$

Impulsos positivos somente

$$f(x) = \begin{cases} k \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2a}x\right) & \text{se } -a \leq x \leq a \\ 0 & \text{se } -\pi \leq x < a \text{ ou } a < x \leq \pi \end{cases}$$



Série de Fourier: $f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx)$ onde $a_0 = \frac{2ak}{\pi^2}$ e $a_n = \frac{4ak \cdot \cos(an)}{\pi^2 - (2an)^2}$

As funções de impulso dependem do valor de a . Este parâmetro possui interpretação física associada à irregularidade. Para exemplificar, sujeira ou poeira no encaixe do rotor do filatório open-end ocasionam pontos finos seguidos de pontos grossos no material fibroso em montagem, ocasionando falhas periódicas de impulsos positivos e negativos. A extensão da sujeira determina a magnitude de a . Neste tipo de falha, a onda básica fundamental é menor em amplitude que certos harmônicos, e a localização da componente de máxima amplitude depende da proporção entre a extensão da falha $2a$ e o comprimento de onda λ .

Desta forma, as duas classes de funções de impulso admitem uma série de *padrões variantes*, de acordo com os possíveis valores de seu parâmetro a , como mostra a figura 4-11.

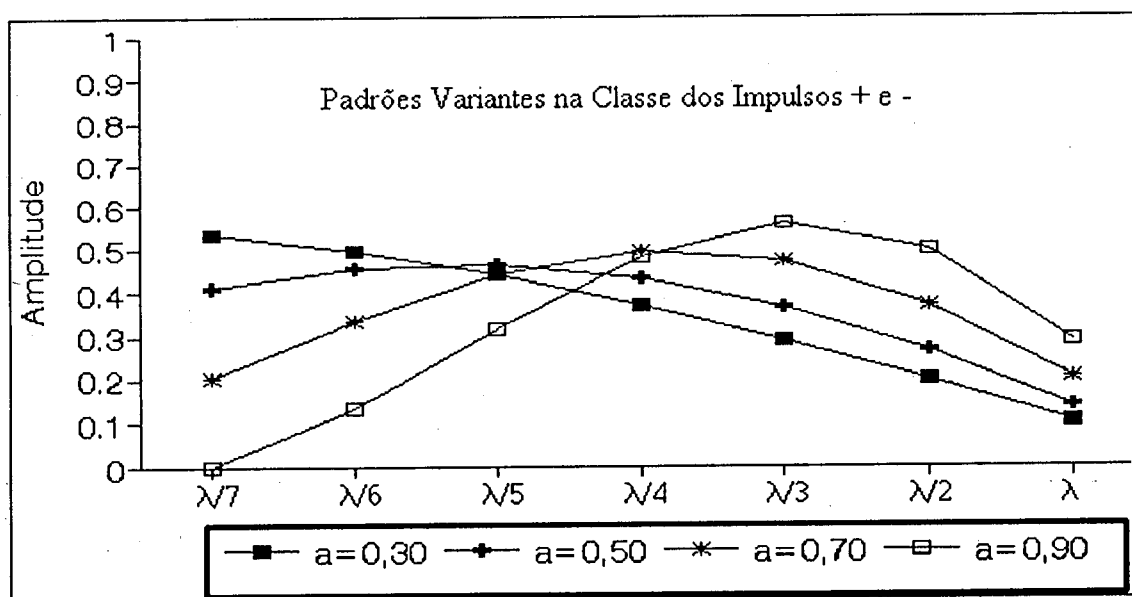


Figura 4-11. Padrões variantes da classe de impulsos positivos e negativos

A tabela 4-1 apresenta os valores relativos dos coeficientes.

| Nome da função | Coeficientes da série de Fourier - λ é a onda fundamental | | | | | | |
|----------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | $\lambda/7$ | $\lambda/6$ | $\lambda/5$ | $\lambda/4$ | $\lambda/3$ | $\lambda/2$ | λ |
| Seno | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 1,00000 |
| Triangular | 0,02041 | 0,00000 | 0,04000 | 0,00000 | 0,11111 | 0,00000 | 1,00000 |
| Dente-de-serra | 0,14286 | 0,16667 | 0,20000 | 0,25000 | 0,33333 | 0,50000 | 1,00000 |
| Impulsos + e - | | | | | | | |
| a = 0,30 | 0,53343 | 0,49559 | 0,44167 | 0,37303 | 0,29171 | 0,20032 | 0,10195 |
| a = 0,50 | 0,41188 | 0,45357 | 0,46213 | 0,43299 | 0,36589 | 0,26516 | 0,13930 |
| a = 0,70 | 0,20797 | 0,33575 | 0,44111 | 0,49406 | 0,47328 | 0,37294 | 0,20559 |
| a = 0,90 | -0,00191 | 0,13544 | 0,31839 | 0,48413 | 0,56015 | 0,49665 | 0,29233 |
| Impulsos + | | | | | | | |
| a = 0,30 | 0,28359 | 0,32090 | 0,35506 | 0,38487 | 0,40926 | 0,42736 | 0,43850 |
| a = 0,50 | 0,12922 | 0,20457 | 0,28590 | 0,36653 | 0,43922 | 0,49703 | 0,53424 |
| a = 0,70 | -0,01423 | 0,05309 | 0,15729 | 0,28816 | 0,42702 | 0,55040 | 0,63554 |
| a = 0,90 | -0,05160 | -0,04567 | 0,02277 | 0,16417 | 0,36010 | 0,56488 | 0,72043 |

Tabela 4-2. Coeficientes relativos das séries de Fourier das irregularidades

Não há modelo matemático teórico para a onda de estiragem. Sua forma, por assemelhar-se a uma curva normal, será aproximada a esta para a obtenção de padrões comparativos. A onda de estiragem abrange todos os canais do agrupamento que a manifesta.

4.4.2 Distribuição das Amplitudes no Espectrograma

Considere-se que o comprimento da onda fundamental seja λ . Os harmônicos, quando presentes, podem ser expressos da forma λ/m para $m = 2,3,4,\dots$. No equipamento Uster Tester III, caso se manifestem individualmente em canais singulares, a onda fundamental e seus harmônicos são localizados no canal n , determinado por (4.7). Esta equação é obtida a partir de (4.4), considerando que os limites extremos de onda do canal n sejam $\lambda_{n-1/2}$ e $\lambda_{n+1/2}$.

$$n - 0.5 \leq 5 \cdot \log_2((\lambda / m) / 1,122) + 1 < n + 0.5 \quad (4.7)$$

Desta forma, se a onda fundamental se concentra no canal n , o canal que contém o harmônico λ/m pode ser determinado por aproximação inteira à $5 \cdot \log_2((\lambda / m) / 1,122) + 1$

$\approx n - 5 \cdot \log_2 m$. O quadro 4-1 apresenta os canais que contém a onda fundamental e os primeiros harmônicos.

| m | canal $n - 5 \cdot \log_2 m$ |
|---|------------------------------|
| 1 | n (fundamental) |
| 2 | n-5 |
| 3 | $n-7,92 \cong n-8$ |
| 4 | n-10 |
| 5 | $n-11,61$ |
| 6 | $n-12,92 \cong n-13$ |
| 7 | $n-14,04 \cong n-14$ |

Quadro 4-1. Distribuição dos picos de uma irregularidade periódica não-senoidal

A onda $\lambda/5$ pode estar nos canais n-11, n-12 ou distribuída entre ambos. Tudo depende da exata localização de λ . Considerando que os harmônicos até $\lambda/7$ são em número suficiente para bem caracterizar o padrão, para finalidades de classificação, a análise cobre então uma faixa contida no vetor de excessos sobre o espectrograma normal, de tamanho 15. Além do mais, as ondas de estiragem também podem adequar-se satisfatoriamente nesta faixa. Assim, os seis *padrões de irregularidades* disponíveis podem ser colocados em vetores de tamanho 15, denotados por $\mathbf{p}_i = (p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{(15)i})$, onde i designa o padrão. Os vetores dos padrões de irregularidade periódica não-senoidal possuem distribuição dada pelo quadro 4-2.

| coordenada do vetor \mathbf{p}_i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|-------------|---|---|-------------|----|----|----|----|-----------|
| comprimento de onda em i | $\lambda/7$ | $\lambda/6$ | $\lambda/5$ | $\lambda/5$ | $\lambda/4$ | | $\lambda/3$ | | | $\lambda/2$ | | | | | λ |

Quadro 4-2. Distribuição da onda fundamental e seus harmônicos

Vetores $k \cdot \mathbf{p}_i$ ($k > 0$) ou aproximações a estes encontram-se adicionados em algum lugar ao espectrograma normal quando a irregularidade de padrão i está presente, não descartando a possibilidade do efeito da distribuição do pico de irregularidade entre canais vizinhos, afetando desta forma a distribuição típica do quadro 4-2.

CAPÍTULO 5

5. REDES NEURAIS

5.1 Introdução

Redes neurais artificiais, ciência da neurocomputação e processamento paralelo são termos usados como sinônimos para designar o mesmo: um campo de estudos que procura, através de modelos baseados nos neurônios biológicos e sistema nervoso animal, captar a essência do mecanismo operatório dos neurônios, abstraindo suas propriedades operatórias mais importantes, bem como descobrir as propriedades emergentes do comportamento coletivo destes elementos.

Parte dos trabalhos pioneiros são devidos a MCCULLOCH e PITTS [CUL43], HEBB [HEB49], ROSENBLATT [ROS59] e WIDROW [WID60]. Após um período de desencanto, devido ao impacto negativo causado pelo livro *Perceptrons*, por Marvin MINSKY [MIN69], as pesquisas retomaram vulto a partir de 1982 com a publicação dos trabalhos do matemático e biólogo inglês John HOPFIELD [HOP82]. Foram também fatores de forte influência os desenvolvimentos recentes na área da microeletrônica, tornado possível a implementação em hardware de redes neurais de concepções mais avançadas.

Adotando um paradigma distinto da clássica concepção simbolista da Inteligência Artificial, a concepção conexionista anseia pela solução de problemas considerados como tipicamente difíceis. Nestas classes de problemas, pode-se destacar: reconhecimento e síntese de voz, reconhecimento de escrita, memória associativa, percepção de traços marcantes, habilidades humanas complexas, reconhecimento de objetos por parte de robôs, tomada de decisão em ambientes complexos, previsão de tempo e controle de processos.

Muitos destes problemas exigem habilidades que a programação puramente algorítmica e sequencial não está sendo capaz de atingir. O ponto-de-vista da concepção conexionista crê que tais capacidades humanas só podem ser reproduzidas artificialmente com a im-

plementação de modelos cognitivos que procuram reproduzir as capacidades naturais do cérebro humano.

A sinergia de esforços com as outras áreas de conhecimento relacionadas beneficia não apenas o desenvolvimento da neurocomputação. Pesquisas na área da neurofisiologia prometem avanços mais substanciais a respeito do cérebro humano por estudar redes neurais artificiais que realizam com sucesso tarefas cognitivas. Psicólogos encontram a oportunidade de praticar novas teorias de aprendizagem, checando sua eficiência e engenheiros eletrônicos aperfeiçoam a microeletrônica ao vencer obstáculos de implementações em hardware de arquiteturas de redes neurais.

Boa parte do jargão utilizado em neurocomputação é tomado emprestado da biologia. Expressões como *neurônio*, *sinapse* e *conexões sinápticas* são de uso freqüente. A fim de evitar confusão, o termo neurônio pode ser substituído pelo termo *elemento de processamento* (EP). Os modelos de redes neurais artificiais, no entanto, constituem uma simplificação a respeito do funcionamento do verdadeiro neurônio biológico. Essencialmente, a abstração que conduz ao elemento de processamento das redes neurais artificiais procura efetivar uma modelagem matemática simplificada do comportamento dos sinais elétricos envolvidos na atividade neural. No estágio atual, as pesquisas não adentram nas complexidades dos processos bioquímicos envolvidos, como a dinâmica de neurotransmissores e atuação das enzimas.

No artigo clássico intitulado *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, publicado em 1943, MCCULLOCH e PITTS [CUL43] propuseram um modelo simplificado de neurônios biológicos. O modelo baseia-se no fato de que, em dado instante de tempo o neurônio ou está disparando ou está inativo. Os fatos básicos que tornaram possível a modelagem matemática do neurônio foram:

- neurônios comportam-se como “somadores algébricos”; adicionam entradas excitatórias e subtraem entradas inibitórias;
- neurônios possuem uma propriedade de “limiar”, isto é, quando as entradas integradas excedem o limiar, disparam um sinal através do axônio;
- neurônios comportam-se analogicamente, enquanto o axônio comporta-se de forma digital.

Sistemas dinâmicos são empregados para prever o comportamento futuro de uma rede neural, quando possível. A equação de energia computacional de uma rede recorrente, quando possível de ser modelada, possibilita prever condições de estabilidade para a rede.

Em termos de aprendizagem, costumam ser utilizadas teorias tomadas da psicologia, que se aplicam bem às redes neurais artificiais, como o behaviorismo e a lei de Hebb (do reforço de aprendizagem). Estas teorias permitem modelar mecanismos matemáticos para alterar os pesos das conexões sinápticas. A crença científica atual justifica no ajuste das conexões sinápticas as capacidades mentais peculiares dos seres vivos superiores na escala biológica.

5.2 Níveis de Descrição Estrutural

Mesmo que redes neurais sejam ainda uma nova tecnologia, elas não são simples. A fim de entender suas estruturas, devem ser considerados seus diferentes níveis:

- **Micro-Estrutura** - As características de cada EP na rede .
- **Meso-Estrutura** - A organização da rede.
- **Macro-Estrutura** - Mesclagem redes diferentes para executar diferentes tarefas ou endereçar problemas de grande escala (redes híbridas).

Será sumarizada a operação de um EP típico, inspirado no modelo biológico, como mostra a seguinte figura 5.1.

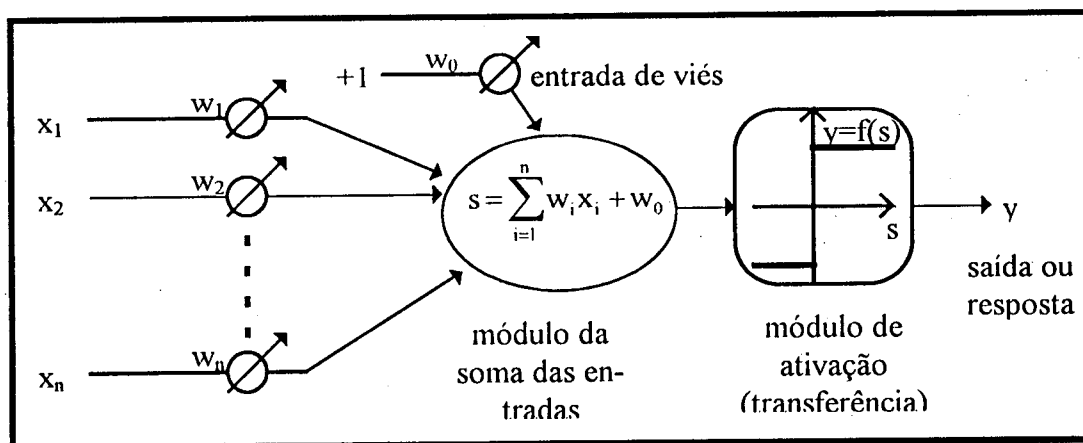


Figura 5-1. Modelo do elemento de processamento

Sua dinâmica é descrita a seguir. O EP recebe um conjunto de sinais de entrada de outros EP's. É então computada a soma ponderada entre os sinais de entrada e os pesos das conexões. O resultado disto é aplicado à *função de ativação* (também chamada de *função de transferência*). O resultado final é chamado de ativação do EP. As equações (5.1) refletem esta dinâmica.

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad \text{e} \quad y = f(s) \quad (5.1)$$

As características em que um EP difere um do outro, e que podem ser modificadas para prover maior performance incluem: mudança da função de transferência e adição novos parâmetros ou funções para a rede (tais como viés, ganho, e limiares adaptativos).

O *viés* é uma entrada adicional que pode ser acrescentada ao neurônio artificial, não proveniente de nenhum outro neurônio, e de valor de entrada fixado em +1. É utilizado em alguns paradigmas, como no caso da rede Perceptron de múltiplas camadas. Seu peso de conexão, w_{oj} , é ajustável pelo aprendizado como qualquer outro peso de conexão. Embora inexista biologicamente, seu uso no modelos artificiais provê meios de transladar o valor de limiar da função de transferência para 0.

As funções de transferência podem variar entre modelos. Podem ser classificadas em funções de saídas discretas e de saídas contínuas. Redes Perceptron de múltiplas camadas com algoritmo de treinamento backpropagation empregam funções de transferência contínuas e diferenciáveis. Tipicamente, neste caso são empregadas as funções chamadas de *sigmoidais*: a função logística e a função tangente hiperbólica.

O nível meso-estrutural de uma rede neural é o nível em que a organização e arranjo físico dos EPs na rede é considerado. Para caracterizar grupos de neurônios, devem ser considerados: (i) o número de camadas da rede; (ii) o número de neurônios por camada; (iii) tipo de conexões (forward, backward, lateral) e (iv) o grau de conectividade entre os EPs: um a um, conectividade plena, esparsa, randômica, etc.

Estas são características modificáveis em uma rede neural. As considerações meso-estruturais são importantes especialmente para distinguir classes diferentes ou tipos de arquiteturas de redes. Considerando as distinções especificadas, podemos identificar cinco classes

estruturalmente diferentes de rede: (i) multicamadas, redes feedforward, (ii) camada simples, redes conectadas lateralmente, (iii) bi-camadas, redes feedforward/feedback, (iv) multicamadas, redes cooperativas, e (v) redes híbridas.

5.3 Metodologia de Desenvolvimento

Não há ainda nenhuma metodologia de desenvolvimento de redes neurais aceita universalmente. Várias delas baseiam-se em ciclos de vida de sistemas convencionais e pesquisadores esforçam-se em tentar definir quais seriam os passos a serem percorridos desde a concepção até a plena utilização de uma rede neural. Enquanto o desenvolvimento de redes neurais é considerado ainda uma arte, alguns resultados empíricos podem ser compilados para auxiliar na sua confecção. Segundo BALLEY, em [BAL90], as fases de desenvolvimento são:

1. **concepção**: seleção da aplicação e seleção do paradigma neural;
2. **projeto**: seleção do conjunto de treinamento, seleção do ambiente de desenvolvimento, implementação da rede, treinamento da rede, testes e depurações;
3. **manutenção**: integração com outros sistemas, avaliação do sistema, modificação dos dados ou software.

5.4 Modelos de Redes Neurais

Esta seção apresenta modelos alternativos de redes neurais que servirão à aplicação proposta, para os propósitos de classificação de padrões irregularidades em espectrogramas.

5.4.1 Rede Perceptron de Múltiplas Camadas

Conhecidas também como redes feedforward, têm sido apontadas pela literatura como um potente instrumento para classificação de padrões. Sua arquitetura envolve duas ou mais camadas interconectadas (figura 5-2).

A camada de entrada, serve apenas para distribuir os valores de entradas para a próxima camada. Estes valores de entrada podem ser números reais quaisquer.

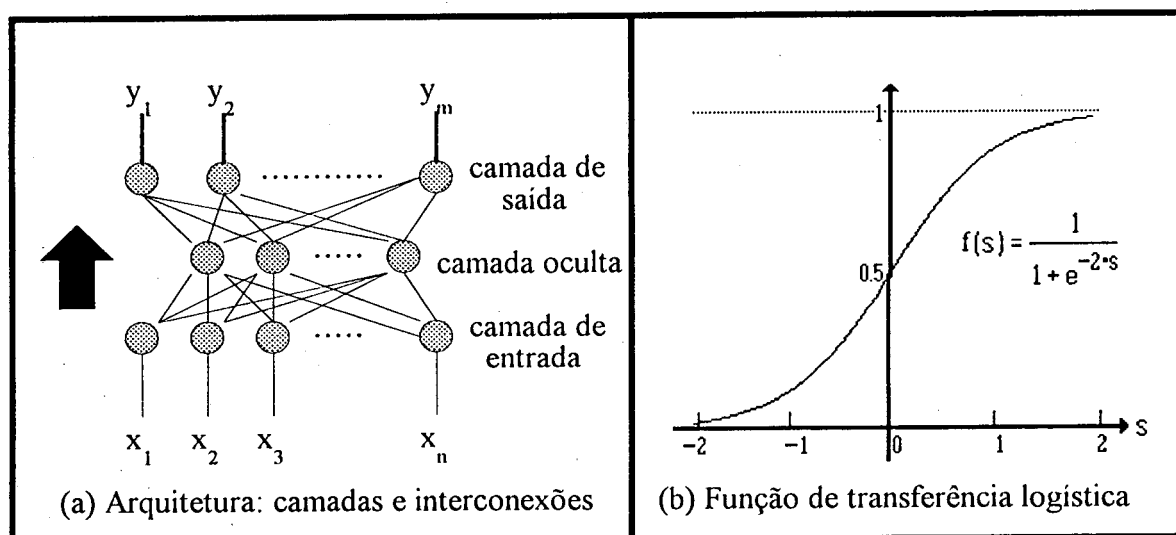


Figura 5-2. Uma rede neural feedforward

Os EP's de cada camada efetuam processamento paralelo distribuído. Cada EP que pertence a alguma camada posterior à camada de entrada efetua a soma ponderada de suas entradas pelos pesos das interconexões, e calcula sua saída de acordo com a função de transferência. Assim que uma camada processou suas entradas, distribui suas saídas para a camada seguinte até atingir a camada de saída. As camadas situadas entre a camada de entrada e a camada de saída denominam-se camadas ocultas, e a elas são atribuídas as capacidades de generalização e de abstração da rede.

Estas redes são heteroassociativas e seu aprendizado é supervisionado. Isto significa que, durante a fase de treinamento, pares de treinamento são apresentados à rede para que esta adapte seus pesos. Cada par é constituído de um vetor de entrada e um vetor de saída desejada. O vetor de entrada é processado, e a saída da rede é comparada à saída desejada, computando-se daí a diferença entre eles, que gera uma medida de erro. A partir daí, efetuam-se alterações nos pesos das interconexões, mediante algum algoritmo de aprendizagem, visando diminuir o erro quando da próxima passagem do mesmo vetor de entrada.

Em operação normal, após seu treinamento, simplesmente apresenta-se um vetor de entrada à rede, que o processa e gera um vetor de saída. Do ponto de vista matemático, estas redes operam como mapeadores, isto é, redes com n EP's na camada de entrada e m EP's na camada de saída podem ser vistas como aplicações unívocas $\varphi: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^m$.

A capacidade de aprendizagem de um padrão por parte da rede mede o quanto a resposta da rede encontra-se próxima da saída desejada. Para isto, fixa-se de antemão um valor $\varepsilon > 0$, e dizer que a rede foi capaz de aprender um determinado padrão p , na forma de um par $(\mathbf{x}_p, \mathbf{d}_p) \in \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^m$, significa que pode-se obter uma resposta da rede próxima o suficiente do valor desejado, satisfazendo $|\varphi(\mathbf{x}_p) - \mathbf{d}_p| \leq \varepsilon$. Não se pode exigir do aprendizado que $\varphi(\mathbf{x}_p) = \mathbf{d}_p$, porém é possível arbitrar uma margem de erro pequena o suficiente para os propósitos desejados, aceitando-se a partir daí a rede como treinada o suficiente para que possa ser posta em operação regular.

Alguns resultados teóricos já foram estabelecidos com relação à capacidade de aprendizagem desta rede [MAS93].

1. Se uma função consiste de uma coleção finita de pontos, uma rede de 3 camadas (1 camada oculta) é capaz de aprendê-la.
2. Se uma função é contínua e definida sobre um domínio compacto, uma rede de três camadas é capaz de aprendê-la.
3. Sob condições muito gerais, todas as funções que podem ser aprendidas por uma rede neural, podem ser aprendidas por uma rede de 4 camadas (2 ocultas).

Estas propriedades conferem às redes feedforward a característica de serem consideradas *aproximadoras de funções universais*. Para que a capacidade de aprendizagem mencionada nas propriedades seja possível, apenas se exige um número suficiente de EP's na camada oculta. Porém, não se conhece nenhum método a priori que estabeleça a quantidade mínima de EP's na camada oculta. Também não se conhecem meios para estabelecer diretamente os pesos, isto é, o processo de aprendizagem é necessariamente um processo iterativo.

Além disso, foi verificado que muitas funções que não seguem os critérios acima podem também ser aprendidas por uma rede de 3 camadas. Em particular, descontinuidades podem ser teoricamente toleradas sob todas as condições prováveis de serem encontradas na prática. Estas condições cobrem a maioria dos problemas práticos.

A grande dificuldade consiste no treinamento para a fixação dos pesos. *Backpropagation*, desenvolvida por RUMELHART, HINTON e WILLIAMS [RUM86] é a técnica usual de treinamento para redes multicamadas com propagação para frente. Utiliza o método da re-

gra delta generalizada, isto é, a partir da equação do erro quadrático de saída, dada em função dos pesos das interconexões, basicamente determina a direção do vetor gradiente dos pesos, promovendo seu ajuste gradativamente por uma série de passos, em cada um efetuando uma pequena descida na superfície do erro quadrático. Este ajuste inicia nos pesos dos EP's da camada de saída, retrocedendo até os pesos dos EP's da primeira camada oculta.

Alguns problemas são comuns durante o treinamento backpropagation. A rede pode cair em pontos de *mínimos locais* no espaço dos pesos das interconexões, pois a superfície de erros é normalmente muito convoluída. Outro problema que pode ocorrer no aprendizado é conhecido como *paralisia da rede*. Este ocorre devido à superfície de erros tornar-se, em algumas regiões, muito plana. Como a correção dos pesos em backpropagation é proporcional ao valor da derivada da função de ativação, ocorre que, quando a soma ponderada das entradas num EP for de magnitude muito elevada, a derivada fica próxima de zero, ocasionando quase nenhuma troca nos pesos. Neste estado o EP está saturado. Se a saturação atinge grande quantidade de EP's, a rede paralisa, isto é, não há mais modificação sensível nos pesos da rede.

5.4.2 Camada Competitiva Lateralmente Conectada

Duas formas de localização e isolamento de um agrupamento individual dentro de um vetor de entrada serão apresentadas: (i) o uso de uma camada competitiva lateralmente conectada e (ii) o esquadramento do foco de atenção seletiva. A primeira proposta está ilustrada na figura 5-3.

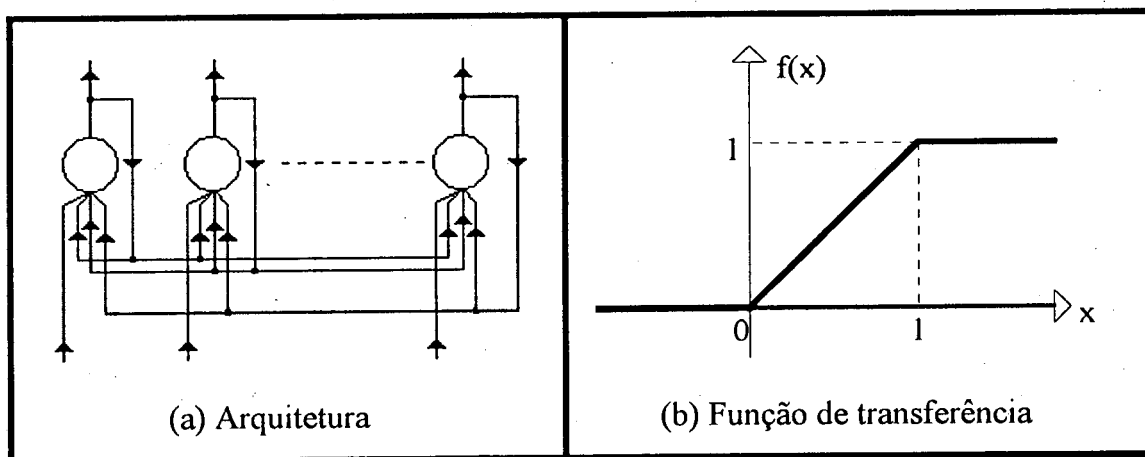


Figura 5-3. Camada lateralmente conectada

Pelas conexões laterais, as saídas dos EP's realimentam suas próprias entradas e as entradas dos demais. Nesta camada, os EP's cooperam e disputam entre si os sinais de entrada, de acordo com o sinal algébrico dos pesos das conexões, iterativamente, até alcançarem um possível estado de estabilidade. A equação que rege o processo iterativo para cada elemento j da camada cooperativa/competitiva, na transição para a iteração $(k+1)$ é:

$$x_j^{(k+1)} = f \left(\frac{\sum_i x_i^{(k)} \cdot w_{ij}}{\sum_i x_i^{(k)}} + b_j \right) \quad (5.2)$$

onde

$x_i^{(k)}$ é a ativação do i -ésimo EP, na iteração k ;

w_{ij} é o peso da conexão da saída do elemento i para a entrada do elemento j ;

b_j é um escalar;

f é a função de transferência.

Para precaver-se contra crescimentos de magnitudes de sinais de forma desordenada e não-limitada, a escolha de f deve ser feita para alguma função que prende os limites superiores e inferiores de seus argumentos. Uma solução simples consiste em adotar-se a função rampa de acordo com (5.3).

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < 0 \\ 1 & \text{se } x > 1 \\ x & \text{se } 0 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

Escolhendo-se adequadamente os pesos das conexões, a convergência fica assegurada, por atender aos critérios estabelecidos para a obtenção do mínimo global para alguma função de energia computacional da rede, de acordo com o teorema de LIAPUNOV para a estabilização de sistemas dinâmicos. O procedimento para a escolha dos pesos deve refletir as características de distribuição dos agrupamentos de interesse possíveis. Se os padrões são conexos no domínio, escolhem-se pesos positivos para as conexões de cada EP com seu espaci-

almente vizinho e, eventualmente, para os próximos vizinhos. Pesos negativos devem encontrar-se presentes em W , para que exista o efeito de inibição lateral, senão a rede estabiliza-se com todos as componentes de $x^{(k)}$ iguais a 1.

EP's interconectados com pesos positivos cooperam mutuamente tentando crescer em ativação, e os interligados com pesos negativos possuem força inibitória, atuando num processo competitivo. Objetivando a formação de um agrupamento único, de extensão suficiente para abranger um intervalo que contenha algum agrupamento de interesse, os pesos devem ser estabelecidos de forma que EP's vizinhos mais próximos interconectem-se com pesos positivos, diminuindo estes à medida em que os EP's se distanciem. Na medida em que as iterações progredirem, a convergência deverá acentuar as ativações dos EP's pertencentes ao agrupamento vencedor, até o limite máximo permitido pela função de ativação, inibindo o conjunto complementar de EP's até que as ativações daqueles caiam ao valor mínimo permitido. Este processo deverá estabilizar com as ativações, em sua maioria, convergindo para os valores binários máximo e mínimo da função de ativação, respectivamente 1 e 0. Alguns valores situados na fronteira do agrupamento selecionado poderão estabilizar para valores intermediários.

Os valores unitários dentro do vetor de ativação após a ocorrência da convergência identificam o local do agrupamento selecionado, permitindo isolar o mesmo para análise. Processa-se então o produto entre os valores do vetor de entrada e seus correspondentes valores no vetor de saída, resultando num vetor contendo um único agrupamento isolado.

Valores $b_j < 0$ farão com que, na ausência de ativações significativas, elas sejam inibidas e nenhum agrupamento sobreviva. A ausência de formação de um novo agrupamento determina o fim do procedimento de busca de agrupamentos.

5.4.3 Esquadrinhamento do Foco de Atenção

A segunda forma de localização e isolamento de um agrupamento individual dentro de um vetor emprega a técnica de focalização baseada no esquadrinhamento de uma janela de observação que se desloca sobre o vetor de entrada x .

Havendo um agrupamento de interesse presente em x , em algum momento o deslocamento da janela irá enfoca-lo de forma conveniente para obter sua classificação, pois a janela irá transferir seus dados para a entrada a uma rede classificadora. A figura 5-4 mostra a rede.

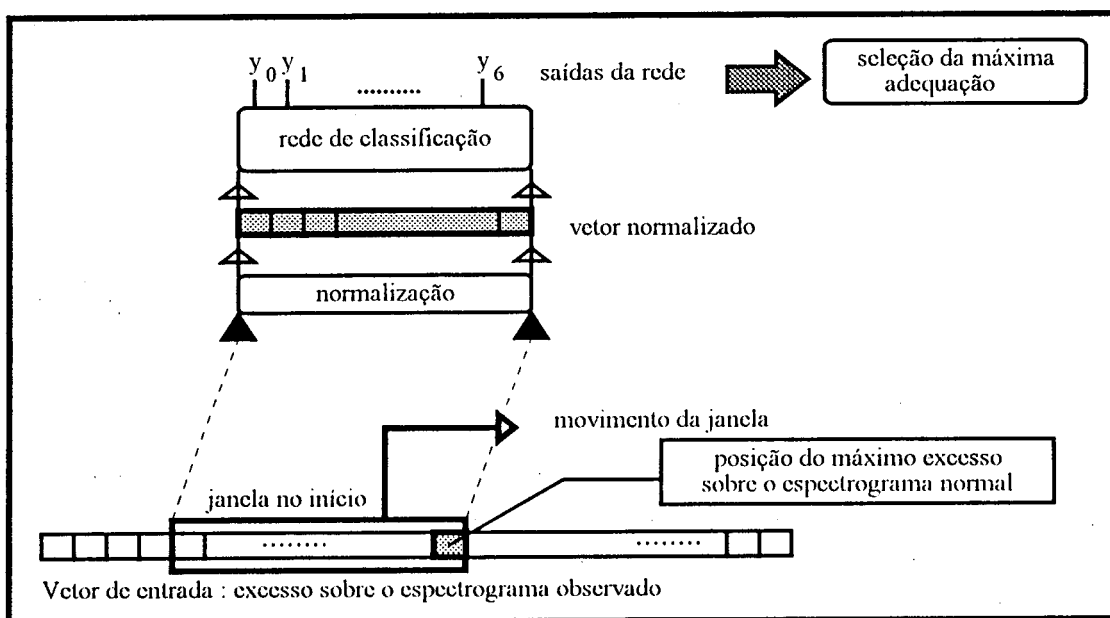


Figura 5-4. Rede com esquadramento do foco de atenção seletiva

Uma janela de observação é um vetor de dimensão r , menor que a dimensão do vetor de entrada x e contém um subconjunto de valores adjacentes de x . Sua dimensão deverá ser suficiente para conter o agrupamento possivelmente presente. A janela que contém a k -ésima componente de x na j -ésima posição dentro da janela é denotada por $J_k(j) = (y_1, y_2, \dots, y_r)$. Para possibilitar a existência de janelas que contenham x_k em qualquer posição j onde $1 \leq j \leq r$, valores da janela que excedem a extensão de x são preenchidos com zeros. A família de todas as janelas de observação que contém x_k será denotada por $\mathfrak{J}(k) = \{J_k(j) \mid 1 \leq j \leq r\}$.

Dado que existe o interesse em classificar apenas agrupamentos de amplitude relevante, alguma forma de medida AR_i para cada valor do vetor x deve ser avaliável. Seu valor determina a continuidade ou parada do processo iterativo. O algoritmo é descrito a seguir.

1. Encontre k tal que $x_k = \max\{x_i \mid x_i \text{ é coordenada de } x\}$. Se $AR_k < \text{valor de mínima relevância}$, pare; senão vá ao passo 2.
2. Para toda janela de observação $J_k(j) \in \mathfrak{J}(k)$, obtenha a janela normalizada $n = J_k(j) / |J_k(j)|$; atribua n à entrada da rede classificadora e a processe, retendo a adequação da classificação;

3. Se o valor de máxima adequação na saída da rede é superior a um determinado valor mínimo relevante para efeitos de classificação, o padrão saída da rede é aceito e as componentes de x correspondentes à janela são zerados.
4. Retorne ao passo 1.

A técnica de esquadramento atua como um seletor da melhor adequação entre todas as possibilidades que contenham determinado pico relevante.

5.4.4 MaxProd: uma Rede Discriminadora Baseada em Padrões

Assumindo que o problema de determinação do agrupamento esteja resolvido, através da técnica da camada lateralmente conectada, a existência de um pequeno número de padrões representativos para as classes existentes permite a implementação de uma rede feedforward utilizando alguma técnica de similaridade.

LIPPMAN [LIP87] publicou um modelo de rede conhecido com rede Maxnet para classificação de vetores de entradas binárias $+1/-1$ de acordo com a similaridade à padrões previamente estocados nos pesos das conexões. Esta rede simplesmente implementa a similaridade medida a partir da distância de Hamming entre vetores. A idéia de similaridade será estendida para entradas contínuas através de outra forma: o uso do produto escalar entre vetores. A implementação desta proposta será denominada de MaxProd (figura 5-5).

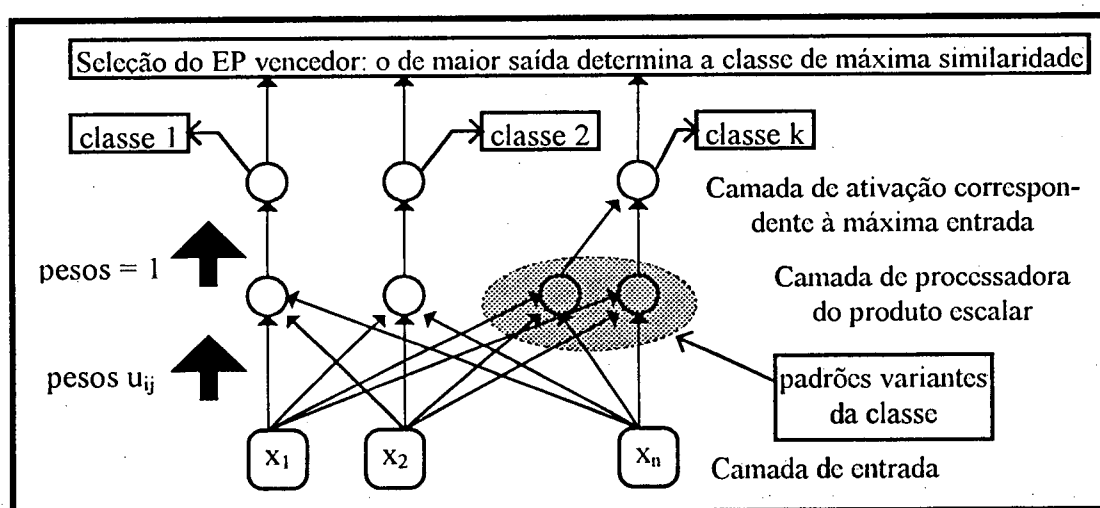


Figura 5-5. Arquitetura da rede Maxprod

O conjunto de m padrões normalizados será representado por $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, onde $|u_j| = 1$ para $1 \leq j \leq m$. Toda entrada deve ser classificada por algum critério de similaridade à algum destes m padrões. Uma camada de entrada de n EP's possui a função de distribuição de um vetor de entrada x de n componentes. Esta camada de entrada é plenamente interconectada a uma nova camada processadora, composta de m EP's, um para cada padrão. Os pesos à entrada de cada EP j estocam o padrão normalizado u_j .

O vetor x na camada de entrada será distribuído a cada EP j da segunda camada que computa o produto escalar $s_j = u_j \cdot x$. A função de transferência é linear, portanto as saídas são os valores s_j . A máxima similaridade é determinada pelo máximo valor de s_j .

Se cada um dos padrões normalizados u_j é representativo de uma classe, distinta, bastaria acoplar à saída da segunda camada uma terceira camada lateralmente conectada com pesos laterais inibitórios e realimentação da saída à entrada para promover uma competição entre os EP's, conhecida como "winner-take-all". Este tipo de competição equivale à escolher o EP de maior saída da segunda camada. O mecanismo de competição dentro de uma camada lateralmente conectada não precisa ser implementado numa rede simulada por software, onde a seleção da maior saída por comparação de valores é mais eficaz.

Quando ocorre a existência de variações de padrões, que mapeiam para a mesma classe de padrão, uma adaptação consiste na adição de uma nova camada, contendo o número exato de classes. Cada EP nesta camada, representativo de uma classe, recebe entradas únicas de cada padrão para o qual não existem variantes dentro da classe, e recebe entradas de todas as variantes da classe quando estas existem. Neste caso, basta a cada EP da terceira camada selecionar a maior entrada para promover sua ativação. Deve ser tomada a maior saída da terceira camada como sendo a classe de máxima similaridade.

A seguir é apresentado o algoritmo de MaxProd.

Inicialização:

- inicialize o vetor de pesos na entrada de cada EP j da primeira camada de processamento com os valores do vetor normalizado u_j .
- inicialize os pesos na entrada dos EP's da segunda camada com valores 1.

Algoritmo:

1. apresente um padrão de entrada x na camada de entrada;

2. compute a saída $s_j = u_j \cdot x$ de cada EP j da primeira camada;
3. compute a saída $y_r = \max \{ s_j \mid s_j \text{ é entrada ao EP } r \}$ para cada EP r da segunda camada;
4. determine o vencedor v tal que $y_v = \max \{ y_r \mid 1 \leq r \leq k \}$;
5. se houverem mais padrões a classificar, volte ao passo 1, senão finalize.

Esta rede apresenta as seguintes vantagens:

- não necessita de aprendizagem. Os pesos são determinados a priori, através do conhecimento das classes básicas e seus variantes de padrões;
- por usar apenas funções de transferência linear e seletora do valor máximo das entradas, a rede opera mais rapidamente que as redes feedforward multi-camadas;
- é facilmente adaptável, em caso de alteração nos padrões básicos, por não necessitar de nenhum método de treinamento. Basta adaptar a inicialização;
- possui robustez comparável ao de redes feedforward treinadas pelos meios convencionais, como backpropagation [RUM86], para problemas desta natureza.

Por ser especificamente projetada, a aplicabilidade da rede proposta fica restrita a solucionar apenas uma categoria específica de problemas, com características similares ao atualmente tratado, a saber, problemas no qual poucos padrões representativos são suficientes para bem caracterizar as variações da classe. Embora o modelo seja destituído de capacidades de abstração e generalização, isto não constitui problema para a presente aplicação.

5.4.5 Redes de Ligações Funcionais

PAO [PAO89] sugere a introdução de redes de ligações funcionais como uma forma alternativa equivalente ao trabalho desempenhado pelas camadas ocultas da rede: o de abstrair características de padrões. A razão para a escolha desta metodologia baseia-se no pressuposto de que o conhecimento a priori de certas transformações funcionais, em que os dados irão expor suas características mais salientes, quando tratadas, reduz a necessidade da rede fe-

edforward para a abstração e generalização de características mais complexas, tarefas normalmente atribuídas à(s) camada(s) oculta(s). Consegue-se desta forma, muitas vezes, contornar problemas intratáveis ou reduzir o número de camadas ocultas. A técnica consiste em efetuar-se um pré-processamento nos dados de entrada, para então aplicar-se os dados transformados à rede (figura 5-6).

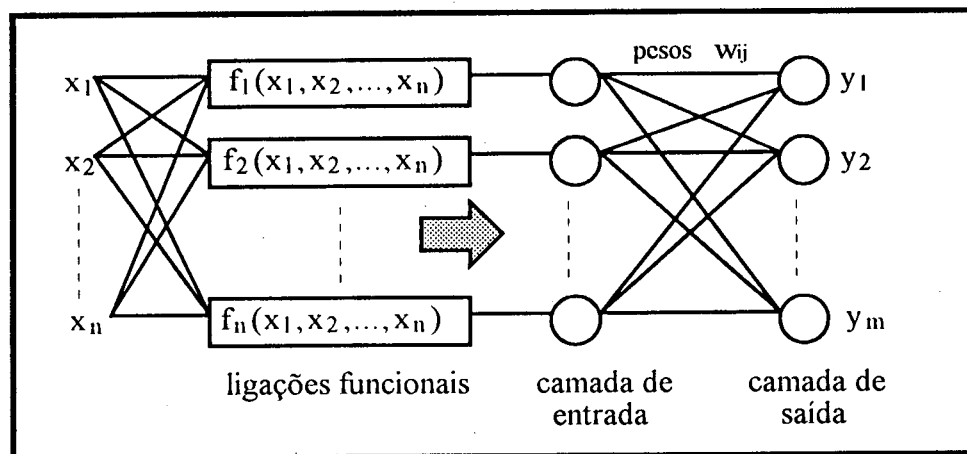


Figura 5-6. Uma rede de ligações funcionais

Como desvantagem, aponta-se para o fato de que não é claro o modo de identificar as ligações funcionais adequadas a um problema específico. Contudo, algumas técnicas de ligações funcionais apresentam características mais universais, e devem ser abordadas.

SPIRKOVSKA e REID [SPI90] aperfeiçoaram uma arquitetura de redes neurais de ordem mais elevada, as redes pi-sigma (ou redes HONNs) cujo pré-processamento consiste de somas de produtos de elementos distintos da camada de entrada. Outras técnicas baseadas em ligações funcionais podem ser mencionadas, como o emprego de momentuns e pré-processamento por transformada de Fourier. Esta última será abordada.

5.4.6 Pré-Processamento por Transformada de Fourier

A transformada de Fourier (TF) constitui uma técnica extensivamente utilizada em processamento de sinais. O primeiro passo é conseguir isolar um agrupamento único no vetor de dados, pelo emprego de alguma técnica como a camada cooperativa-competitiva lateralmente conectada. Pode-se, então, admitir a possibilidade de ligações funcionais que utilizem a

normalização do vetor seguida de uma TF, para tratar respectivamente da característica de invariância a mudanças de escala e translações.

A invariância à mudança de escala pode ser efetivada, calculando-se o vetor unitário \mathbf{u} a partir da normalização do vetor \mathbf{x} .

A TF preserva as propriedades fundamentais dos dados: há uma correspondência biunívoca entre as funções e suas transformadas, o que a torna univocamente definida. Além disso, ela pode ser discretizada, o que torna viável seu tratamento computacional. Dado um vetor $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{n-1})$, sua TF discreta resulta num vetor complexo $\mathbf{z} = (z_0, z_1, \dots, z_{n-1})$ cujas componentes podem ser calculadas por (5.4), ou por métodos mais eficientes, como a transformada rápida de Fourier³. Referências à respeito da transformada e da transformada rápida podem ser encontradas em [BRI88].

$$z_i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k e^{-j2\pi ik/n}; \quad \text{para } 0 \leq i \leq n-1 \text{ e } j = \sqrt{-1} \quad (5.4)$$

A sua propriedade mais importante, refere-se ao deslocamento. Para uma translação inteira h , o vetor \mathbf{u}' de componentes $u'_k = u_{k-h}$ possui por transformada o vetor \mathbf{z}' de componentes fornecidas por (5.5).

$$z'_i = z_i \cdot e^{-j2\pi ih/n} \quad (5.5)$$

Desta forma, $|z'_i| = |z_i|$, para $0 \leq i \leq n-1$. Considerando $|\mathbf{z}| = (|z_0|, \dots, |z_{n-1}|)$ a amplitude (ou *potência espectral*) de \mathbf{z} , conclui-se que $|\mathbf{z}'| = |\mathbf{z}|$, ou seja, a amplitude da TF é invariante à translação. A proposta resume-se na utilização do algoritmo descrito a seguir.

1. isolamento de um agrupamento em \mathbf{x} . Se não há, pare, senão prossiga;
2. normalização do vetor, resultando em $\mathbf{u} = \mathbf{x} / |\mathbf{x}|$;
3. cálculo da TF discreta de \mathbf{u} , resultando em \mathbf{z} ;

³ desde que a dimensão do vetor seja alguma potência de base 2.

4. cálculo do vetor de amplitudes $|z| = (|z_i|)$;
5. aplicar $|z|$ à camada de entrada de uma rede feedforward multi-camadas para classificação do agrupamento;
6. exclusão do agrupamento verificado e retorno ao passo 1.

Ocorre ainda uma propriedade de que as componentes equidistantes ao centro do vetor (z_1, \dots, z_{n-1}) sempre são números complexos conjugados, isto é, $z_{n-i} = z_i^*$, portanto de mesma norma. Significa, portanto, que praticamente a metade das componentes de $|z|$ se repetem. Pode-se, portanto, reduzir as necessidades de pré-processamento eliminando as redundâncias e o tamanho da rede neural pela redução da quantidade de EP's na camada de entrada à praticamente a metade. Sob este prisma de redução da complexidade, é interessante efetuar primeiro a transformada de Fourier e o cálculo das amplitudes apenas da parte não-redundante do vetor para posteriormente normalizar e submeter esta parte à camada de entrada da rede.

A rede feedforward é treinada com vetores de entrada de possíveis padrões de classificação provenientes do pré-processamento nos passos 2, 3 e 4. Cada vetor de entrada para treinamento resulta do pré-processamento de um vetor de mesmo tamanho que o vetor x , que contém um padrão em qualquer local e zeros nas demais posições não ocupadas pelo padrão, e deve ser associado à um vetor de saída de classificação correspondente.

Para a localização do pico de onda fundamental, considera-se que a TF discreta de x seja z e de x' seja z' , e que existe uma translação h entre x e x' . Pode-se calcular o parâmetro de translação h a partir de (5.6), para $i > 0$, onde se considera que as componentes de z e de z' possuem ângulos de fase respectivamente iguais à φ_{z_i} e $\varphi_{z'_i}$.

$$h = n(\varphi_{z_i} - \varphi_{z'_i}) / (2\pi i) \quad (5.6)$$

Neste caso, um dos vetores será a entrada classificada pela rede, e outro será o vetor contendo o padrão correspondente ao classificado, em posição conhecida - pode ser o vetor correspondente usado para o treinamento da rede. Embora a média dos valores de h computados sobre todos os canais tenha se mostrado pouco consistente, o emprego da mediana sobre o conjunto de valores tem demonstrado bons resultados.

CAPÍTULO 6

6. SISTEMAS ESPECIALISTAS

6.1 Introdução

Os *sistemas especialistas* procuram criar modelos de conhecimento e de experiência de um especialista dentro de um determinado domínio de conhecimentos. As formas de representação do conhecimento mais utilizadas são: (i) lógica matemática, (ii) regras de produção, (iii) redes semânticas e (iv) quadros e roteiros.

Através das regras de produção o raciocínio do especialista é representado por regras de produção, do tipo “*se premissa então conclusão*”. Estas regras são cuidadosamente coletadas por um engenheiro de conhecimento por meio de entrevistas com um especialista da área na qual se quer criar a base de conhecimento. A interpretação e a formalização têm sido a grande dificuldade de criação destes sistemas [RET84]. Tenta-se muitas vezes formalizar um conhecimento que é subjetivo. Além do conhecimento formal, outros elementos, como intuição e sensibilidade ao problema podem ser utilizados pelos especialistas. Estes dificilmente são formuláveis por meio de regras.

6.2 Conveniência de Uso

Inicialmente, serão apresentadas as justificativas acerca da conveniência de empregar-se um sistema especialista para uma determinada tarefa - relacionada a uma área de conhecimentos. WATERMANN, em [WAT86] aconselha como linha de guia o seguinte.

“Considere sistemas especialistas somente se seu desenvolvimento é possível, justificado e apropriado.”

Ainda WATERMANN apresenta as condições necessárias e suficientes para que se possa considerar o desenvolvimento de um sistema especialista possível, justificado e apropriado. O desenvolvimento é possível se todas as condições a seguir forem atendidas:

1. a tarefa não requer senso comum;
2. a tarefa requer somente habilidade cognitiva;
3. os especialistas podem articular os seus métodos;
4. existem especialistas genuínos;
5. a tarefa não é excessivamente dificultosa;
6. a tarefa não é pobremente compreendida.

O desenvolvimento é justificado quando qualquer uma das condições a seguir de verificar:

1. a solução da tarefa tem um alto custo;
2. a especialização humana está sendo perdida;
3. a especialização humana é escassa;
4. a especialização humana é necessária em muitas localizações;
5. a especialização é necessária em ambientes hostis.

A tarefa é considerada apropriada se atender às seguintes condições:

1. requer manipulação simbólica;
2. requer soluções heurísticas;
3. não é muito fácil;
4. é de tamanho gerenciável.

6.3 Estágios para o Desenvolvimento

Em essência, é preocupação fundamental na criação de um sistema especialista a obtenção de uma performance que alcance ou se situe tão próxima o quanto possível a de um especialista humano dentro do domínio de conhecimentos ou problemas em que ele se situe.

Desde cedo, observou-se que seu desempenho como solucionador de problemas do mundo real deveria repousar fundamentalmente em cima de conhecimentos acerca do mundo real, daquilo que se denomina de base de conhecimentos. FEIGENBAUM enfatiza em [FEI81] que:

“o vigor de um sistema especialista deriva do conhecimento que possui e não de um particular formalismo ou esquema de inferência que empregue”

o que também é confirmado por HAYES-ROTH e WATERMAN [HAY83]:

“Um conhecimento especializado por si só constitui-se em fator necessário e aproximadamente suficiente para o desenvolvimento de um sistema especialista.”

Com base nestes pressupostos sentiu-se a necessidade de criar um ramo de conhecimentos que procurasse obter, estruturar e sistematizar o conhecimento extraído do especialista humano para posteriormente constituir a base de conhecimentos a ser empregada no computador pelos sistemas especialistas. É o que hoje se denomina de *Engenharia do Conhecimento*. O engenheiro de conhecimentos é a pessoa que extrai dos especialistas humanos os seus procedimentos, estratégias e regras de manuseio para a solução de problemas, e reconstrói este conhecimento através de sistemas especialistas.

Os estágios para o desenvolvimento de um sistema especialista, segundo WATERMANN [WAT86], compreendem:

- **Identificação.** Determinação das características do problema.
- **Conceituação.** Escolha dos conceitos para representar o conhecimento.
- **Implementação.** Formulação das regras que englobam o conhecimento.
- **Teste.** Validação das regras implementadas.
- **Revisão.** Inclui eventuais reformulações, redesenhos e refinamentos.

A complexidade inerente ao processo de construção do sistema impede situar todos os passos de seu avanço. Assim, os estágios funcionam mais como uma linha de guia do que uma linha mestra inflexível a ser seguida. O desenvolvimento evolutivo é o caminho mais efetivo a proceder. A necessidade de cada momento deve determinar o próximo passo a seguir.

6.4 Seleção da Ferramenta Adequada

As opções para a escolha de uma ferramenta mais adequada incluem:

- uso de uma linguagem de engenharia de conhecimentos;
- desenvolvimento a partir de uma linguagem de programação procedural;
- uso de uma linguagem de manipulação simbólica, como Prolog ou LISP.

Cada ferramenta apresenta seus prós e contras. O uso de linguagens de engenharia de conhecimento, conhecidas como *shell*⁴, normalmente reduzem o tempo de desenvolvimento. O tempo consumido envolve o aprendizado da linguagem e o desenvolvimento do sistema especialista. Normalmente uma shell é criada para atender uma certa categoria de sistemas especialistas. Embora possam haver sido desenvolvidas para servir de propósito geral a uma categoria específica de problemas especialistas, como os destinados aos problemas de diagnóstico, podem apresentar restrições quanto à disponibilidade e/ou flexibilidade com relação a certos recursos de processamento adicionais necessários. Mencionem-se como recursos adicionais muitas vezes desejáveis a comunicação serial, planilha eletrônica e acesso a bancos de dados.

O desenvolvimento a partir de uma linguagem procedural (como C ou Pascal) permite máxima flexibilidade ao projeto por permitir o acesso a toda a gama de recursos computacionais oferecidos pela linguagem de desenvolvimento. Porém, no caso de se empregar a representação de conhecimentos via regras de produção, isto implica em construir o próprio motor de inferência, seus mecanismos de controle, o algoritmo de unificação e o mecanismo de

⁴ SHELL, é um sistema especialista esvaziado. Dispõe apenas do motor de inferência lógica e o interfaceamento com o usuário.

retrocesso. Todo o interfaceamento com o usuário deve ser construído. Posteriormente vem ainda todo o trabalho de engenharia de conhecimento.

O uso de uma linguagem de manipulação simbólica normalmente oferece as flexibilidades adicionais necessárias, ou os meios para seu desenvolvimento. Porém, por disponibilizar apenas os recursos básicos, como o motor de inferência lógica, não oferece nada em termos de interfaceamento amigável com o usuário - como justificativa de prova ou justificativa do raciocínio em andamento. Em adição, linguagens simbólicas puras não oferecem facilidades imediatas à representação do conhecimento em forma próxima à natural. Porém, o poder da linguagem de manipulação simbólica e predicados especiais oferecem potencialidades para o desenvolvimento de uma representação mais próxima da natural de forma bem mais fácil quando comparado ao uso de uma linguagem procedural para a mesma finalidade.

CAPÍTULO 7

7. O SISTEMA DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE IRREGULARIDADES

Este capítulo apresenta a proposta para a solução do problema. As bases para a detecção de irregularidades em espectrogramas foram apresentadas no capítulo 5. A implementação do processo de detecção de irregularidades constitui o denominado *Subsistema Detecção*. Seu objetivo é prover informações básicas de identificação em uma série de testes, a ocorrência de irregularidades constatadas, sua localização no espectrograma, forma de onda, amplitude e adequação à classificação de acordo com o classificador utilizado. Estas informações deverão constituir entradas para um novo processo: o diagnóstico, o qual toma as informações de detecção, o conhecimento da maquinaria instalada na fiação, seus órgãos e conexões, assim como também outras formas de conhecimento especialista para realizar inferências. A implementação deste processo será denominado de *Subsistema Diagnóstico*. A separação em subsistemas foi motivada pelos seguintes fatores.

- Aspectos conceituais envolvidos: detecção e diagnóstico de irregularidades são etapas perfeitamente distintas.
- Ferramentas de implementação utilizadas de natureza distinta. Detecção, envolvendo uso de procedimentos de comunicação serial e redes neurais e são mais adequadamente implementadas em alguma linguagem procedural científica. Já o diagnóstico, por manipular conhecimentos de natureza relacional complexa e regras de produção, envolvendo tratamento simbólico, destina-se mais adequadamente a uma linguagem de manipulação simbólica como Lisp ou Prolog.
- A divisão facilita a manutenção do sistema no todo.

Este capítulo descreve cada um dos subsistemas numa seção. Ao início de cada seção são apresentadas considerações gerais acerca do subsistema tratado, seguido de sua descrição e implementação computacional. Esforços foram concentrados para que o sistema no seu todo possa adequar-se ao Laboratório de Ensaaios Físicos em qualquer fiação que opere com regulometria, embora o desenvolvimento do projeto tenha sido direcionado pela realidade da empresa-alvo.

7.1 Subsistema Detecção

7.1.1 Considerações Gerais

Para proceder-se à detecção de irregularidades eventualmente presentes no espectrograma de um teste, parte-se do vetor espectrograma do teste e das informações textuais de identificação do material de prova, etapa do processo e máquina de procedência do material, fornecidos pelo regularímetro. Estas últimas permitem identificar o vetor n do espectrograma normal correspondente.

A diferença entre o vetor de amplitudes de irregularidades do espectrograma de teste e o correspondente vetor normal resulta num vetor x de excessos sobre o espectrograma normal, o qual será objeto de análise para o subsistema de detecção. Neste vetor encontram-se: ruídos e evidências de irregularidades de intensidades variadas. O próximo passo será a escolha de uma técnica discriminadora adequada.

Para o reconhecimento bem sucedido de padrões de irregularidades em espectrogramas, o discriminador selecionado deve apresentar as seguintes características.

- Invariância a translações, visto que cada possível padrão de irregularidade pode estar situado em qualquer local do espectrograma.
- Invariância a efeitos de escala sobre as amplitudes dos padrões de irregularidades, pois apenas a proporção entre os picos de um dado padrão importa.
- Tolerância à possibilidade de reconhecer uma componente de onda que se situe próximo à fronteira de dois canais adjacentes e cuja distribuição far-se-á em dois picos nestes dois canais.

- Tolerância à discretização dos dados: os dados de amplitude da irregularidade por canal, transmitidos pela interface serial assíncrona são vetores de bytes, o que força o reconhecimento de padrões expressos como números aproximados.
- Capacidade de classificar mais de um padrão presente no mesmo espectrograma, isto é, possuir capacidade de classificação múltipla. Particularmente, o problema é ainda mais difícil quando dois padrões se sobrepõem.

A literatura técnica especializada aponta diversos discriminadores de possível uso para o problema de reconhecimento de padrões. PAO [PAO89] menciona abordagens como: discriminadores bayesianos, discriminadores baseados em conjuntos difusos, discriminadores semânticos e discriminadores utilizando redes neurais. Mais e mais, as técnicas conexionistas despontam como ferramentas poderosas capazes de produzir bons resultados no reconhecimento de padrões. Este foi o caminho explorado na busca de uma solução.

A metodologia de desenvolvimento de redes neurais apresentada na seção 5.3 foi considerada adequada para os propósitos de desenvolvimento do presente sistema. As fases serão discutidas na presente seção.

Com relação à concepção, a aplicação presente está bem definida: a detecção e o reconhecimento de irregularidades em espectrogramas provenientes de regularímetros. A seção seguinte destaca os esforços desenvolvidos para a seleção de um paradigma neural entre as propostas apresentadas, sustentado pelos modelos de redes apresentados na seção 5.4 para a solução do problema.

Com relação ao projeto, os conjuntos de treinamento provêm de irregularidades conhecidas. Poucos são os padrões básicos, porém destaque-se a existência de variantes de classe para os padrões de onda de impulsos positivos e negativos e impulsos positivos somente devidos à variação de seu parâmetro, a possibilidade de ocorrer divisão do sinal de amplitude correspondente a um determinado comprimento de onda entre canais vizinhos e o ruído aleatório presente no espectrograma lido. Estes fatores multiplicam o tamanho do conjunto básico de treinamento. Para efetivar o treinamento da rede, testes e depurações na fase de projeto, um programa simulador foi especialmente desenvolvido. Seu uso serviu aos duplo propósito de gerar conjuntos de dados de treinamento e conjuntos de testes para a avaliação do sistema durante a fase de manutenção.

O ambiente de desenvolvimento selecionado foi a linguagem C++. A implementação baseou-se na metodologia da programação orientada para objetos. Foi criada uma biblioteca de classes para o desenvolvimento de paradigmas de redes neurais que atenda a possibilidade de criar-se modelos de rede de natureza variada. Esta biblioteca possibilita a criação e implementação da maioria dos modelos de redes neurais tradicionalmente mencionados em literatura específica a respeito. Esta metodologia presta-se ao desenvolvimento de sistemas de alta qualidade, por assegurar a reutilização de componentes cuja confiabilidade tenha sido anteriormente demonstrada [PET91].

A biblioteca de classes não será detalhada. Apenas serão destacados alguns aspectos relevantes.

- Foram criadas classes para a rede, para as camadas e outra para os EP's. Desde que existe um relacionamento hierárquico a nível de composição dentro de uma rede entre as classes mencionadas, as mesmas foram consideradas classes mutuamente amigas.
- A criação de objetos dá-se mediante alocação dinâmica de memória. Desta forma não há restrição lógica para o tamanho da rede.
- Um grande número de funções-membro criadas em todas as classes permite um universo amplo de operações de desenvolvimento de paradigmas, processamento dos dados pela rede e seu exame.
- Foram introduzidas versatilidades para a escolha de funções de transferência, escolha de funções de soma, competição tipo winner-take-all, ganho e escalamento dos dados, escolhidas a nível de camada.
- Alguns algoritmos de aprendizagem conhecidos foram acrescentados à biblioteca, como o backpropagation; outros podem ser facilmente implementados com auxílio do ferramental disponível.
- Redes criadas podem ser gravadas e recuperadas em arquivos de disco. Os pesos das conexões são gravados junto à rede. Desta forma, seu treinamento anterior é recuperado junto à rede.

Esta biblioteca viabiliza a integração que atende às necessidades da fase de manutenção, pelo compartilhamento da biblioteca comum de classes de redes neurais.

A avaliação do sistema foi mensurada de acordo com critérios estatísticos de acerto da rede.

7.1.2 Seleção do Paradigma Neural

Na seção 5.4 foram analisados os seguintes modelos de redes: (i) rede Perceptron de múltiplas camadas, (ii) camada competitiva lateralmente conectada, (iii) esquadramento do foco de atenção seletiva, (iv) rede MaxProd e (v) pré-processamento por transformada de Fourier.

A seleção destes modelos originou-se de seu potencial uso para a solução da tarefa de detecção e classificação de irregularidades em espectrogramas. Esta seção discute os aspectos de desempenho de cada um dos modelos de rede, culminado em propostas de implementação final.

Os resultados em relação ao treinamento simultâneo de todas as características desejadas do discriminador de padrões utilizando-se somente uma rede Perceptron de múltiplas camadas com treinamento backpropagation foram pouco animadores. Muito embora seja possível a existência de uma implementação de rede neste modelo que atenda a todas as características desejadas da rede, apresentadas na seção 7.1.1, o conjunto de treinamento deve ser muito grande para abranger as diversas características simultâneas a serem atendidas, de forma combinada entre si.

Experiências realizadas com redes feedforward foram orientadas para variar o número de EP's na camada oculta. A lentidão do treinamento em implementações de software, que realizam processamento serial ao invés de paralelo constituiu a maior barreira que impediu o prosseguimento de um treinamento mais extensivo. Foi verificado que, quando a rede consegue generalizar uma ou duas característica, perde de controle sobre outras características já anteriormente aprendidas.

Não obstante, o treinamento de redes feedforward possibilitou reconhecer a característica mais difícil de treinar: o reconhecimento de várias irregularidades presentes dentro do mesmo espectrograma observado. Diante da impossibilidade atual de efetuar paralelamente a

análise de mais de um agrupamento de irregularidades presentes num espectrograma - fato que não constitui uma situação impossível e nem altamente improvável - deve-se adotar inicialmente um procedimento seqüencial de detecção de agrupamentos individuais, seguido de posterior solução às demais características.

Como alternativa, redes híbridas permitem combinar diversos paradigmas, desta forma podendo ser conseguida uma performance melhorada. Isto impõe a necessidade de adequar-se o projeto da rede às características desejadas. O primeiro passo consiste na solução do problema da detecção seqüencial de agrupamentos individuais presentes no vetor de entrada x , para posteriormente efetuar a classificação de cada agrupamento selecionado. A primeira proposta neste sentido adota a camada competitiva lateralmente conectada.

Para o problema em questão, foi utilizado o conjunto de pesos (7.1), experimentalmente obtido através de séries de calibragens. O critério para a seleção dos pesos baseou-se na obtenção de agrupamentos individualizados de tamanho suficientemente amplo para conter a onda fundamental mais os harmônicos que possam ser significativos à classificação da irregularidade, porém com a restrição de que o tamanho do agrupamento não exceda ao tamanho máximo necessário.

$$w_{ij} = 3.5(e^{-0.2|i-j|} - 0.25) \text{ para todo } j, \quad b_j = -0.05 \quad (7.1)$$

Os valores calculados partem de um efeito cooperativo máximo, diminuindo à medida em que os EP's se distanciem, passando ao efeito competitivo (valores negativos) para $|i - j| \geq 6$.

Pode ocorrer que alguns valores não pertinentes à irregularidade façam também parte do agrupamento. O tratamento posterior no processo de reconhecimento de padrões deverá possuir robustez suficiente a ponto de admitir estes valores extras ocasionais, presentes no agrupamento, sem comprometer a exatidão da classificação. A situação mais indesejável ocorre quando há sobreposição parcial de dois ou mais padrões, ocasionando a formação de agrupamentos mais largos abrangendo sua união.

Foi testada ainda a inclusão de uma nova camada lateralmente conectada com a mesma dinâmica, conectada à saída da camada anterior e que recebe as saídas da primeira ca-

mada apenas após a ocorrência da convergência. Neste caso adota-se outro conjunto de pesos para obter uma segunda filtragem mais efetiva e mais restritiva nos limites do agrupamento. Ficou comprovado que, no presente caso, o efeito passa a ser equivalente ao de uma poda de valores de pico abaixo de certo valor. Seu lado benéfico é a eliminação de ruídos que permanecem, e a desvantagem inevitável é a eliminação de harmônicos componentes de baixa magnitude, porém presentes no vetor de entrada. Desde que a perda de harmônicos de baixa magnitude não comprometa a classificação de padrões, é viável utilizar-se deste recurso.

A detecção seqüencial de agrupamentos individuais pode também ser realizada através do esquadramento do foco de atenção seletiva. Neste caso, adotou-se amplitude relevante $AR_i = x_i / n_i$, onde x_i e n_i correspondem à i -ésima componente do vetor \mathbf{x} e \mathbf{n} , respectivamente. A razão deve-se ao critério similar adotado pelo especialista em julgar a relevância de um pico de irregularidade.

Não foi verificada nenhuma diferença de desempenho classificador entre o uso de uma camada lateralmente conectada e o esquadramento do foco de atenção seletiva. Optou-se em implementar o esquadramento do foco de atenção, baseado no tempo de processamento mais reduzido para implementações em software.

O próximo passo consiste em submeter o agrupamento isolado à um processo classificador. Para tanto, pode-se optar inicialmente em (i) submeter o vetor de tamanho idêntico ao vetor \mathbf{x} , contendo um agrupamento selecionado e isolado ao classificador e (ii) submeter apenas a janela contendo o agrupamento selecionado ao classificador.

A primeira proposta impõe a necessidade de que a invariância à translação seja característica presente no classificador. A rede neural que utiliza pré-processamento pela transformada de Fourier e normalização do vetor é dotada desta característica. Por sua vez, a segunda proposta consiste em apresentar ao classificador apenas a janela de dados que contém o agrupamento selecionado. Neste caso, a classificação pode ser efetuada por uma rede Perceptron de múltiplas camadas ou por uma rede MaxProd. No caso em que a seleção recaia sobre a rede Perceptron de múltiplas camadas, resta-lhe a tarefa de aprender a abstrair e generalizar as características de robustez à ruídos, discretização do vetor de entrada e à divisão de amplitudes de um pico entre dois canais adjacentes.

Em termos de tempo computacional, Feedforward e MaxProd mostraram maior rapidez em relação ao uso de pré-processamento por transformada de Fourier, possuindo estas

duas tempo de processamento aproximadamente equivalentes. Alguns problemas podem ocorrer durante a fase de isolamento de um agrupamento, quando utilizada a camada cooperativa-competitiva lateralmente conectada: o tamanho do agrupamento resultante pode não se fixo. Nestes casos, um ajuste de poda de uma faixa menos significativa dentro do agrupamento ou o aumento do tamanho do agrupamento corrigem este problema.

A figura 7-1 apresenta as duas propostas de solução num fluxograma.

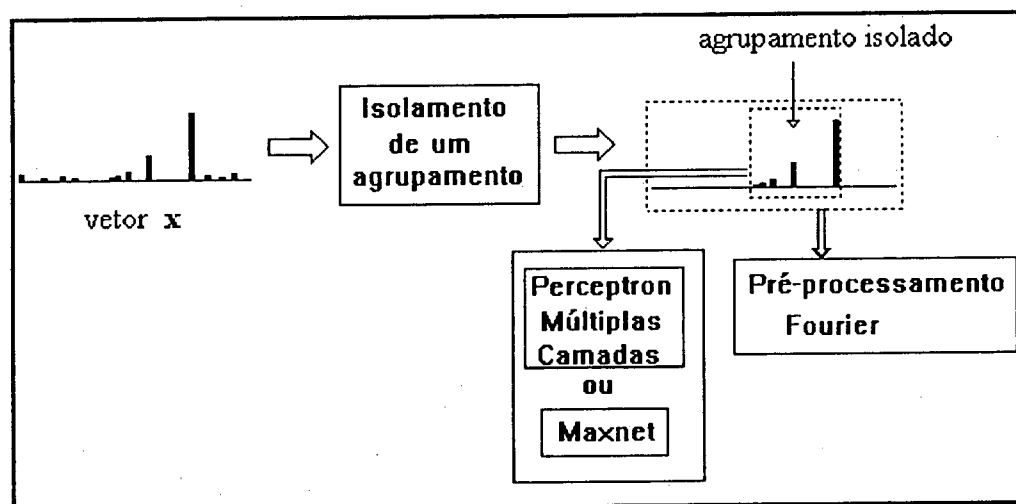


Figura 7-1 .Combinações possíveis de soluções neurais

Foi necessário incluir no conjunto de treinamento diversos exemplos de padrões variantes de classes para ondas com impulso positivo e negativo, impulso positivo somente e de ondas de estiragem, a fim de generalizar a capacidade discriminadora da rede. Além do mais, embutir no conjunto de treinamento dados ruidosos aumentou a robustez da rede.

7.1.3 Implementação Computacional

Esta seção descreve a implementação computacional do subsistema de detecção e classificação de irregularidades.

DIARF⁵ é o nome dado ao sistema computadorizado destinado à ser executado em micro-computadores da linha IBM-PC sob o Windows. Sua finalidade é fornecer suporte téc-

⁵ **DIARF** é acrônimo de Detecção de Irregularidades em Análises de Regulimetria na Fiação têxtil.

nico à regulametria, praticada nos laboratórios das indústrias de fiação têxtil, que se valem de matéria-prima de natureza fibrosa como o algodão. Mais especificamente, capta sinais dos testes executados com o regularímetro Uster tester 3, armazena as informações num banco de dados e permite a realização do processo de detecção e reconhecimento de irregularidades. A figura 7-2 apresenta o fluxograma do sistema.

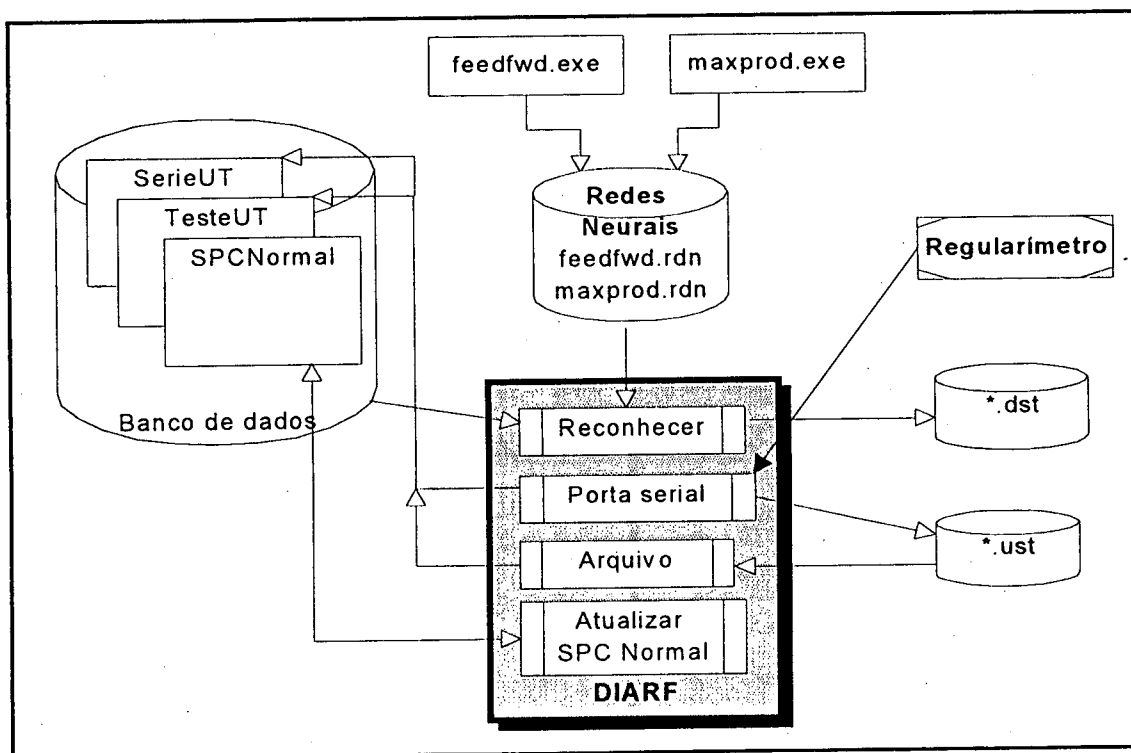


Figura 7-2. O Subsistema Detecção

O sistema interage com um banco de dados relacional cuja finalidade é a de armazenar as informações pertinentes às séries de testes recebidos e o cadastro dos espectrogramas normais, bem como relacionar as diferentes tabelas. O banco é compatível ao sistema de banco de dados Access versão 1.0, da Microsoft. É constituído das 3 tabelas abaixo descritas.

| nome da tabela | finalidade |
|------------------|--|
| SerieUT | armazenar informações das séries de testes |
| TesteUT | armazenar informações dos testes individuais |
| SPCNormal | cadastrar os espectrogramas normais |

As duas redes neurais tornadas disponíveis no sistema, Feedforward e a MaxProd, são gerenciadas pelos programas respectivos **feedfwd.exe** e **maxprod.exe**. Eles permitem a criação de uma rede, sua leitura e escrita em disco. Através da função de revocação da rede, em cada um dos programas, pode-se verificar sua eficiência classificadora. A rede feedforward pode ainda ser treinada pelo seu programa gerenciador.

Os arquivos de extensão 'ust' contém uma imagem idêntica em arquivo texto dos registros recebidos da interface Uster. Cada arquivo pode conter várias séries de testes. São opcionalmente gerados durante a recepção de dados via porta serial para transformação el registros de tabela em processamento posterior. Nesta circunstância, servirão como entrada alternativa por arquivo para a detecção de irregularidades via entrada por arquivo.

Os arquivos de extensão 'dst' contém os diagnósticos de séries de testes. São arquivos textos resultantes do processo de detecção de irregularidades em séries de testes. Contém informações selecionadas entre as transmitidas pela interface Uster, como os vetores de espectrograma (SPG) e de curvas de variação de comprimento das fibras (LCV). Além destas, o sistema adiciona as informações geradas pelo detecção e classificação de irregularidades.

As funções principais do sistema DIARF estão a seguir relacionadas.

1. **Porta Serial.** Recepção de séries de testes Uster 3 via porta de comunicação serial, para gravá-los em arquivo 'ust' e/ou banco de dados.
2. **Arquivo.** Leitura de séries de testes Uster 3 a partir de arquivos de extensão 'ust' para gravá-los no banco de dados.
3. **Reconhecer:** Detectar e reconhecer irregularidades presentes nos testes de uma série de testes Uster 3 gravados no banco de dados por um dos dois comandos acima.
4. **Atualizar SPC Normal.** Permite atualizar os vetores de normais cadastrados no banco de dados. Sua finalidade é a de prover maior ajuste nos vetores de espectrogramas normais, usando os espectrogramas de testes ou edição de valores individuais (para forçar alguma interpolação, por exemplo). Esta função deve ser executada periodicamente até que se obtenham vetores de espectrogramas normais estáveis.

7.2 Subsistema Diagnóstico

7.2.1 Considerações Gerais

O subsistema de detecção fornece as informações necessárias ao subsistema de diagnóstico. As informações de irregularidades presentes num teste, identificadas, localizadas e classificadas necessitam ser tratadas em conjunto com as informações dos equipamentos instalados para a pesquisa das mais prováveis causas. Para solucionar este problema propõe-se o uso de um sistema especialista. Inicialmente, será considerada a sua conveniência, de acordo com as condições apresentadas na seção 6.2.

- **Condições necessárias e suficientes para considerar o desenvolvimento de um sistema especialista.** Um estudo da tarefa e dos especialistas envolvidos evidencia que todas as condições estabelecidas são atendidas. Uma análise da literatura técnica específica à regulamentria permite concluir que a tarefa não é pobremente compreendida, e nem excessivamente dificultosa.
- **O desenvolvimento é justificado.** O custo da tarefa - se tomado como parâmetro o salário do especialista em regulamentria - não é muito elevado dado que se pode treinar especialistas a nível técnico de forma a torna-los aptos ao desempenho das funções de forma satisfatória em pouco tempo de aprendizagem.

A especialização não está sendo perdida. Cursos de regulamentria costumam ser oferecidos a cada nova instalação de equipamentos. Deste ponto em diante, o conhecimento é usualmente transmitido de pessoa a pessoa, contando com o suporte à literatura especializada. A escassez de especialização é um fato sobre o qual inexistem dados suficientes para se concluir algo. Ambientes hostis inexistem dentro de um laboratório de ensaios físicos.

Porém, o fator decisivo que justifica o sistema especialista é a necessidade da especialização em muitas localizações. A rigor deve existir um Laboratório de Ensaios Físicos em toda instalação de fiação têxtil. A USTER relata em [UST89] que, até o final de 1980, aproximadamente 10.000 instrumentos já haviam sido instalados em laboratórios têxteis.

- **Os motivos pelos quais ela é apropriada.** A manipulação simbólica é conveniente à representação do conhecimento, devido à existência de muitas relações de causa e efeito, que podem ser expressas em termos de regras lógicas condicionais, onde os antecedentes e conseqüentes podem ser expressos como proposições contendo relacionamentos entre entidades simbólicas representando máquinas, órgãos e processos. As soluções heurísticas constituem grupos de regras especiais que restringem o processo de busca para soluções melhores ou, em caso de incerteza, para causas mais prováveis. Regras heurísticas também se fazem presentes nesta tarefa. A tarefa não é fácil, pois envolve um grande volume de dados mecânicos de máquinas e órgãos componentes, cálculos de comprimento de onda e efeitos de estiragem acumulativa. Diversificação de causas também dificultam a tarefa. Por fim, ela é de tamanho gerenciável, comprovado através da atual implementação. É muito difícil argumentar, a priori, uma relação entre o volume de conhecimentos real e a quantidade de regras e fatos que irão ser usados para representar um domínio de conhecimentos, assim como é difícil prever o volume de recursos computacionais de memória e processamento necessários para processar um banco de conhecimentos constituído.

A seguir será considerada a seleção da ferramenta adequada. Uma possibilidade é o desenvolvimento a partir de uma linguagem procedural. Isto significa um esforço concentrado de uma equipe e pode tomar anos de trabalho. Tal escolha foi considerada insustentável pois poderia inviabilizar o tempo restrito de desenvolvimento do presente trabalho.

Com uso de uma linguagem simbólica, o tempo necessário para o desenvolvimento fica entre o tempo necessário ao desenvolvimento a partir de uma linguagem de engenharia de conhecimentos e o necessário para o desenvolvimento a partir de uma linguagem procedural, sem perder a potencialidade de uso de recursos extras necessários. Estas considerações foram decisivas para a escolha do desenvolvimento a partir de uma linguagem simbólica.

Para o desenvolvimento da shell foi selecionada linguagem simbólica Arity Prolog 6.0. Além da adequação ao tratamento simbólico, esta linguagem disponibiliza recursos matemáticos imprescindíveis ao cálculo de comprimentos de onda de órgãos e estiragens de máquinas, os quais deverão estar embutidos na base de conhecimento. Outro fator decisor que influ-

enciou na escolha foi sua disponibilidade para microcomputadores. Como o número de regras não chega a 400 - o que caracteriza a base de conhecimentos como de pequeno porte - torna viável seu desenvolvimento a partir desta plataforma.

O resultado do desenvolvimento que culminou num produto denominado SERP, sigla de **Sistema Especialista de Regras de Produção** e a construção de uma base de conhecimentos para esta shell.

7.2.2 Sistema Especialista de Regras de Produção

SERP pode ser caracterizado como um ambiente para o desenvolvimento de uma base de conhecimentos e operação de consultas a sistemas especialistas, adaptado para uma particular categoria de problemas, chamados de “solução estruturada”, para ser utilizado em microcomputadores pessoais compatíveis ao IBM PC, utilizando um ambiente interativo com o usuário, via entrada e saída padrão (teclado e tela). Os domínios dos problemas de solução estruturada são caracterizados por um conjunto finito de possíveis soluções, a melhor das quais pode ser determinada por raciocínio acerca das evidências de possíveis soluções. A interação com SERP se faz mediante um interpretador de comandos.

O SERP usa desta forma o motor de inferência lógica do Prolog, bem como herda suas estruturas básicas de dados e boa parte dos predicados disponíveis na linguagem. Porém, o meta-interpretador especialmente desenvolvido direciona a busca de soluções durante uma seção de consulta em uma base de conhecimentos, atuando sobre fatos, regras e metafatos, permitindo realizações não prontamente disponíveis nos interpretadores Prolog convencionais. Estruturas de dados especialmente definidas constituem características peculiares da linguagem SERP.

Sua sintaxe foi projetada para ser adequada à comunicação humana, facilitando desta forma (i) a tarefa do engenheiro de conhecimentos na construção da base de conhecimentos e (ii) a leitura e compreensão da base por parte do usuário. Os fatos são estruturados de forma similar ao Prolog, e regras possuem a forma **SE premissa ENTÃO conclusão**.

Como Prolog, SERP usa raciocínio inferencial sobre as regras de produção contidas na base de conhecimentos. Seu motor de inferência lógica usa o encadeamento para trás, é

orientado por metas, com pesquisa em profundidade primeiro. As características fundamentais do SERP são:

- representação do banco de conhecimentos em linguagem semelhante ao português. Mensagens sistema-usuário em português;
- facilidades de explanação: o usuário pode perguntar ao sistema porque uma pergunta está sendo feita, bem como acompanhar a prova dedutiva bem sucedida para saber como a máquina de inferência chegou a uma conclusão;
- facilidades de acompanhamento do raciocínio, através de janelas especiais que permitem acompanhar submetas estabelecidas, regras disparadas e conclusões estabelecidas durante a consulta;
- controle de valores legais: as respostas do usuário podem ser inspecionadas para a validação, através de listas de opções e faixas de valores numéricos permitidos, prevenindo assim contra respostas indevidas;
- facilidades aritméticas: o sistema manipula números inteiros e reais, e fornece predicados e funções matemáticas básicas embutidas;
- processamento de listas, estruturas parentéticas e estruturas de operador, tornando SERP uma linguagem de programação simbólica completa;
- memória cache; uma memória que mantém conclusões de regras sucedidas como fatos especiais, para uso futuro. Isto resulta num processo de acúmulo de conhecimento gradativo e controlado;
- possibilita o uso de metafatos, que permitem controlar o processo de inferência;
- possibilidade de alojar grandes bases, que residem numa memória virtual, isto é, a base de conhecimentos pode se estender além da memória física para o disco, que é tratado como uma extensão da memória;
- interpretador Prolog embutido, bem como possibilidade de agregar predicados Prolog ao banco de conhecimentos para execução de macro-procedimentos;
- facilidade de ajuda em linha;
- formato de arquivo texto para as bases de conhecimento: as bases podem ser preparadas por um editor de textos.

7.2.2.1 Sintaxe da Linguagem SERP

A sintaxe da linguagem para representação de bases de conhecimentos SERP consiste de um conjunto de regras de escrita. Ela define as regras para a representação da base de conhecimento. Sua descrição detalhada encontra-se no Anexo II.

Uma base de conhecimentos é constituída por um número de entradas. Entradas em SERP correspondem às cláusulas Prolog, podendo ser (i) metafatos, (ii) fatos ou (iii) regras. Cada entrada que é uma regra ou fato é precedida por um rótulo identificador, de uso obrigatório. Enquanto um fato é constituído de uma proposição simples, uma regra é estruturada na forma “**se** premissa **então** conclusão”, onde a conclusão é uma proposição simples e a premissa pode ser uma proposição qualquer, incluindo operadores lógicos.

Os tipos de dados são caracterizados pelos termos. Um termo pode ser uma variável, um tipo atômico ou uma estrutura. A estrutura é um tipo de dados de propósitos gerais: pode ser usada para agrupar termos ou expressar relacionamentos entre termos. A estrutura parentética é formada por um functor e por seus argumentos. O número de argumentos é a sua aridade. Os átomos - um tipo de termo atômico - são considerados estruturas de aridade zero.

O uso de operadores é meramente uma alternativa sintática para a forma parentética normal, capaz de simplificar a representação desta última. Isto se torna vantajoso quando a estrutura parentética pode se tornar complexa ou até parecer ilegível. Por exemplo,

```
regra_5: se
        idade(Pessoa) = X e
        X >= 21 ou
        formacao(X) = superior
entao
        apto(Pessoa) = sim.
```

é uma regra sintaticamente correta. Caso fosse escrita inteiramente na forma parentética, apareceria como abaixo. Internamente é armazenada da seguinte forma:

```
:(regra_5,se(entao(ou(e=(idade(Pessoa),X),>=(X,21)),=(formacao(X),superior)), =
(apto(Pessoa),sim)))).
```

Uma estrutura_operador é uma variação sintática da forma parentética com um functor, formada pelo seu operador e um ou dois argumentos. O operador pode ser algum átomo (cotado ou não), ou alguma sequência de um ou mais caracteres especiais. Existem operadores predefinidos disponíveis na linguagem. Se estes ocorrem numa estrutura de operador, sua precedência deve ser inferior à 750. Os operadores serão detalhados adiante. O usuário pode definir outros operadores de expressividade especial num dado banco de conhecimentos, mediante metafatos específicos declarados. A única restrição imposta por SERP é que sua precedência é fixa.

Inteiro é um número de 4 bytes, entre -2.147.483.768 e 2.147.483.647. REAL é número de ponto flutuante entre -1.7e308 e 1.7e308 com 15 decimais de precisão. String são constantes textuais, delimitados por '\$'. Variáveis começam com um caracter sublinha ou com letra maiúscula.

Lista é uma estrutura de características particulares. Por definição, uma lista pode ser uma lista vazia ([]) ou constituída de uma cabeça -que é um termo- e uma cauda -que é uma outra lista. Na forma parentética a lista não-vazia é representada com uso do operador binário infixado *ponto* ('.'), cujo operando à esquerda é a cabeça da lista e o operando à direita é o resto da lista. Porém, é mais utilizada a primeira representação. Listas de caracteres ASCII permitem uso de uma notação própria: podem ser escritos como cadeias de caracteres (strings). A lista irá conter os valores ASCII dos caracteres. A manipulação eficiente de listas mais o uso de recursividade nas cláusulas propicia grande poder às linguagens de manipulação simbólica.

A interpretação semântica da linguagem segue os padrões adotados pela maioria dos sistemas especialistas da categoria de representação de conhecimentos por regras de produção e não será detalhada.

7.2.2.2 Características Adicionais Relevantes

O Anexo III apresenta numa tabela o conjunto de operadores usados por SERP. Nesta aparece a precedência do operador, o símbolo usado para representá-lo, a forma associativa e seu significado semântico.

Quanto menor o valor de precedência de um operador, mais internamente ela se situará na estrutura parentética correspondente, isto é, sua operação será avaliada antes. A forma associativa pode ser: fx , fy , xf , yf para operadores unários, e xfx , xfy , yfx para operadores binários. Nestas, a letra 'f' denota a posição do operador, e as letras 'x' e 'y' denotam a posição de seus operandos ou argumentos. Assim, os operadores fx e fy são prefixados, xf e yf são pós-fixados e xfx , xfy , yfx são entrefixados. A letra 'x' denota ausência de associatividade, enquanto que 'y' designa associatividade permitida. Assim, por exemplo, a divisão '/' possui forma associativa yfx , que significa tratar-se de um operador binário com associatividade à esquerda.

O usuário pode aumentar esta tabela, definindo novos operadores de propósitos especiais em sua base de conhecimentos, visando maior clareza de representação do conhecimento. Para tal, deverá declarar metafatos da forma 'prefixo = operador', 'entrefixo = operador' e 'posfixo = operador'.

Para poder implementar um subconjunto amplo da lógica de primeira ordem, a linguagem disponibiliza o tipo de dado *variável* em suas cláusulas. A máquina de inferência permite que variáveis livres possam ser instanciadas desde que o algoritmo da unificação detecte um casamento válido. Um tipo especial de variável, denominada de *variável anônima* e representada pelo traço sublinha ' ' atua como quantificador existencial. Neste sentido, uma vez que a instanciação à uma variável anônima tenha ocorrida com sucesso, o *mecanismo de retrocesso* não tentará soluções alternativas de instanciação à variável anônima.

A busca de soluções alternativas a uma meta é possível graças ao mecanismo de retrocesso, que permite desfazer os passos computacionais, retilhando de volta até o ponto de poder explorar soluções alternativas através de outras unificações possíveis. Este mecanismo é empregado sempre que a procura de soluções falha em algum ponto. A ocorrência de variáveis anônimas fará SERP apenas verificar se o instanciamento é possível, e assim, durante o retrocesso, soluções alternativas de unificação com a variável anônima não são procuradas.

O sistema assume que todo o conhecimento de que SERP necessita durante uma sessão de consulta deve estar presente no banco de conhecimentos, na forma direta de fatos ou dedutíveis a partir de regras na base, ou deve ser um fato questionável, o que pode ser controlado através do metafato '**questao**(TERMO) = TEXTO'. Neste último caso, o usuário será indagado sobre o fato necessário ao raciocínio desenvolvido numa consulta, caso TERMO

não seja encontrado por outros meios de pesquisa. A presença deste metafato será a última tentativa que o motor de inferência tentará verificar para tentar estabelecer uma prova.

O operador $=$, contrariamente ao seu uso em Prolog para tentar unificar os termos interligados, foi definido em SERP para que possa ser usado na representação de proposições simples da forma '**atributo = valor**'. Embora tal representação possa ser contornada com outra forma de representação, como uma forma funcional **f(atributo,valor)**, esta última carece de legibilidade para usuários não familiarizados em representação na sintaxe Prolog.

Metafatos são fatos especiais. Ao invés de estabelecerem fatos ou regras acerca do domínio abrangido pela base de conhecimentos, os metafatos declaram características especiais de controle que SERP irá observar durante uma pesquisa, o que faz o motor de inferência levar a cabo alguns serviços extras durante o processo de inferência. Isto é, metafatos são fatos de controle sobre o banco de conhecimentos ao invés de fatos sobre o conhecimento.

Uma vez que metafatos possam vir a serem imediatamente postos em ação, no momento de sua carga, sua ordem de entrada na base de conhecimentos é significativa. O quadro 7-1 apresenta o repertório de metafatos aceitos por SERP.

| Metafato | Descrição |
|--|--|
| questao (<i>termo</i>) = <i>texto</i> | Declara que uma proposição simples da forma <i>termo=valor</i> , não-existente no sistema, pode ser inquirida ao usuário durante uma consulta, se for necessária e não for encontrada. A <i>mensagem</i> é apresentada ao usuário, e SERP fica então aguardando uma resposta do mesmo |
| vlslegais (<i>Termo</i>) = <i>vlslegaisaceitos</i> | Pode ser usado conjuntamente ao metafato ' questao (<i>termo</i>) = <i>texto</i> '. Restringe o escopo de respostas aceitas a valores legais especificados por este metafato. <i>vlslegaisaceitos</i> pode ser: <ul style="list-style-type: none"> - uma lista de valores simbólicos legais, como [<i>amarelo,verde,azul</i>]; - inteiro(<i>a,b</i>) onde <i>a,b</i> são números inteiros. Serão aceitas somente respostas inteiras neste intervalo fechado; - real(<i>a,b</i>). Como acima, porém <i>a, b</i> podem ser com números inteiros ou reais. Se um valor legal <i>vl</i> for digitado como resposta, será criada uma entrada no cache da forma <i>termo = vl</i> |
| multivaluado (<i>termo</i>) | Este metafato fará SERP aceitar uma lista de respostas do usuário, para cada uma das quais uma entrada da forma <i>expressão = vl</i> será criada no cache. Quando presente na base um metafato vlslegais (<i>expressão</i>) = <i>vlslegaisaceitos</i> , cada resposta da lista será checada com os valores legais aceitos e, se todos forem aceitáveis, então serão criadas as entradas no cache |
| explanacao (<i>rotulo</i>) = <i>string</i> | apresenta a string, um texto associado ao rótulo de algum fato ou regra, quando o usuário deseja explanação sobre o porque, durante uma consulta |

| | |
|--|--|
| cache(proposição-simples) | Permite selecionar as proposições que devem permanecer no cache, por considera-las relevantes e necessárias em novas consultas, constituindo assim um acúmulo dinâmico de conhecimentos. A presença deste metafato fará com que, após o sucesso em conseguir estabelecer uma submeta com esta proposição simples, para a mesma seja criada uma entrada na memória cache. O usuário pode gravar a memória cache, se quiser, e recuperar estas informações em futuras sessões SERP |
| inicializa = lista | <i>lista</i> contém uma série de solicitações que deverão ser executadas a cada início de uma sessão SERP. Estas deverão ser atendidas como se formassem uma lista de solicitações ao nível do interpretador, isto é, podem ser comandos, expressões aritméticas e predicados do sistema |
| meta = proposição - simples | Se presente, <i>proposição-simples</i> se torna a meta quando uma consulta é acionada pelo comando iniciar |
| prefixo = operador entrefixo = operador sufixo = operador | Permite ao usuário definir e habilitar um operador prefixado / entrefixado / sufixado para uso próprio na sua base de conhecimentos. Seu uso será desabilitado no momento de limpar a base |

Quadro 7-1. Metafatos aceitos por SERP

Expressões matemáticas realizam computação numérica. Uma forma de conseguir a avaliação de uma expressão matemática é com o predicado 'is', escrito na forma sintática **Var is Expr**, o qual força a avaliação da expressão **Expr** e unifica o resultado com a variável **Var**, se ainda não-instanciada. Em caso de erro na expressão **Expr**, a unificação será com o átomo **err**. Por exemplo: **X is 1+2** ou ainda **X is '+'(1,2)** avalia a expressão **1+2**, a qual resulta em 3, e unifica **X** com o resultado 3.

Para efetuar matemática, três entidades devem ser consideradas.

- **Constantes:** são mencionados pelos predicados **pi** (que avalia para 3,14159...) e **random** (que avalia para um valor aleatório entre 0,0 e 1,0).
- **Operadores matemáticos:** que, juntamente com seus argumentos, constituem expressões matemáticas básicas. Podem ser utilizados os operadores matemáticos do quadro 7-2.
- **Predicados matemáticos:** predicados unários que aceitam um argumento numérico. Quando avaliados, retornam o resultado da aplicação da função sobre seu argumento, desde que corretamente instanciado. Os predicados matemáticos aceitos são implementações das funções científicas usuais.

| Operador e operandos | Operação |
|----------------------|---|
| $X + Y$ | adição |
| $X * Y$ | multiplicação |
| $X - Y$ | subtração |
| X / Y | divisão real |
| $X // Y$ | divisão inteira - resultado é um inteiro |
| $X ^ Y$ | potenciação |
| $-X$ | oposto (corresponde à $(-1)*X$) |
| $X \wedge Y$ | conjunção bit-a-bit entre os inteiros X e Y |
| $X \vee Y$ | disjunção bit-a-bit entre os inteiros X e Y |
| $\backslash(X)$ | negação bit-a-bit / complementar de X (X inteiro) |
| $X << Y$ | retorna X com seus bits deslocados por Y bits para a esquerda |
| $X >> Y$ | retorna X com seus bits deslocados por Y bits para a direita |
| $X \bmod Y$ | resto da divisão de X por Y |

Quadro 7-2. Expressões Matemáticas Básicas

Expressões mais complexas podem ser construídas a partir de expressões básicas, agregando-as mediante operadores de acordo com suas precedências e formas associativas. Assim, '`integer(3 * sin (X * pi / 4)) << 2`' é uma expressão matemática válida, avaliável desde que X esteja instanciado a um valor numérico.

Uma expressão matemática não é avaliada e seu resultado não é computado até que a expressão apareça como um argumento de um predicado matemático avaliável. Estes predicados aritméticos podem ser usados tanto com inteiros quanto com números reais, exceto quando exigem argumento inteiro somente.

Quando um inteiro e um número real estão envolvidos em uma expressão aritmética, o inteiro é convertido para real antes da realização do cálculo, e o resultado é um número real. A conversão de um número real para um inteiro pode ser explícita, via predicado `integer/1`, e a conversão inteiro para real é realizada via predicado `float/1`.

Os predicados matemáticos avaliáveis são: $E1 > E2$, $E1 < E2$, $E1 \geq E2$, $E1 \leq E2$, $X \text{ is } E1$, $E1 ::= E2$, $E1 \neq E2$, `randomize(+Semente)`, `inc(+X,-Y)` e `dec(+X,-Y)`. Nestes $E1$ e $E2$ representam expressões matemáticas válidas.

A relação completa dos predicados não-matemáticos de SERP é apresentada no quadro 7-3.

| Categoria | predicado/aridade |
|------------------------------------|--|
| diversos | rg/3, functor/3, call/1, (not)/1, concat/2, concat/3, system/1, tring_term/2, var/1, nonvar/1, anexar/3, membro /1, for/3, listadir/1, omando/1; |
| classificação de termos | tom/1, atomic/1, integer/1, number/1, string/1, ref/1, var/1, lista/1; |
| predicados para coletar termos | agof/3, findall/3, setof/3; |
| controle de entrada e saída padrão | ls/0, nl/0, tab/1, get/1, put/1, read/1, stdin/2, stdout/2, write/1, exiba/1, guarde/2; |
| manipulações de arquivo | reate/2, open/3, close/1, read/2, read_line/2, write/2, writeq/2; |
| cláusulas na data-base | bolir/0, asserta/1, assertz/1, clause/2, retract/1, abolish/1, listing/0, listing/1, restore/0, save/0, consult/1, reconsult/1, current_predicate/1; |
| termos na database | ey/2, keys/1, record_after/3, recorda/3, recordz/3, recorded/3, nref/2, th_ref/3, replace/2, erase/1, eraseall/1, expunge/0, instance/2; |
| tabelas hash na database | emoveallh/1, recordh/3, removeh/3, replaceh/4, retrieveh/3; |
| árvores binárias na database | ecordb/3, removeallb/1, removeb/3, replaceb/4, retrieveb/3, betweenb/7, etweenkeysb/4, what btrees/1. |

Quadro 7-3. Predicados SERP

A maioria destes são predicados Arity/Prolog. SERP, por sua vez, possui alguns outros predicados exclusivos seus. São estes: anexar/3, membro/2, lista/1, exiba/1, aguarde/2, predicado/1, for/3, listadir/1 e comando/1. Sua finalidade é prover facilidades adicionais, frequentemente necessárias. Segue uma descrição dos predicados exclusivos de SERP.

- anexar(L1,L2,L3): a lista L1 anexada à lista L2 fornece a lista L3;
- lista(L): é bem-sucedido se seu argumento L for uma lista;
- membro(?M,+L): se M está instanciado, e é membro da lista L, o predicado é bem sucedido; se M é variável não-instanciada, retorna os elementos membros da lista L, uma a um por retrocesso;
- exiba(+Termo): exibe o Termo. Se Termo é uma lista, interpreta cada membro da lista, que pode ser um controle especial ou um termo a ser exibido.
- aguarde(+Mensagem,-Tecla): exibe a Mensagem na saída padrão e aguarda o usuário teclar algo, retornando em Tecla o código ASCII do caracter teclado;

- `for(-Contador,+Inicio,+Fim)` : Inicio e Fim devem ser números inteiros, com `Inicio < Fim`. Contador será instanciado a valores inteiros desde Inicio até Fim, através de retrocessos. Este predicado implementa um laço contador;
- `listadir(+Caminho)` : Lista diretório do Caminho especificado na tela corrente;
- comando `+Com`: executa o comando SERP Com válido.

7.2.2.3 A Máquina de Inferência

A *máquina de inferência lógica* SERP é a unidade de processamento que efetua todo o processo inferencial sobre o banco de conhecimentos carregado na memória, visando atender uma meta específica. Ela é o coração do SERP. Foi escrita a partir de um conjunto de cláusulas Prolog constituindo um meta-interpretador.

Como Prolog, SERP utiliza a estratégia de busca orientada por metas, isto é, usa o encadeamento de trás para frente. Esta estratégia tem por princípio que, para atender uma meta, é necessário que ela possa ser atendida imediatamente de alguma forma, sem auxílio de regras, ou então ela unifica com a conclusão de alguma regra.

A substituição oriunda da unificação é aplicada à toda a regra - conclusão e premissa - e para que a conclusão seja válida, a premissa deve ser satisfeita, conforme a regra inferencial *modus ponens*. Isto torna o motor SERP um subconjunto da lógica de primeira ordem. Se a premissa é uma disjunção de proposições, basta que uma das proposições seja satisfeita para estabelecer a conclusão. Se for uma conjunção, cada proposição ligada pelo operador lógico 'e' torna-se uma nova submeta a ser satisfeita. Uma negação da forma 'nao P' é satisfeita se P falhar.

As diferenças mais salientes no atendimento de metas com relação à máquina de inferência de Prolog são:

- SERP mantém uma trilha para reconstituir a prova do raciocínio inferencial, ao término desta, bem como uma trilha das regras de prova para responder a perguntas 'porque' feitas pelo usuário durante uma consulta.

- SERP possui mais alternativas para procurar atender metas. Prolog procura apenas por fatos e regras. SERP procura ainda expressões na memória cache e expressões questionáveis. A pesquisa de SERP é ordenada conforme segue:

1. se a meta unifica com alguma expressão colocada no cache;
2. se a meta é um fato da base;
3. se é um predicado que pode ser resolvido pelo sistema;
4. se é uma negação, conjunção ou disjunção. Neste caso, o(s) argumento(s) do(s) operador(es) lógicos constituem novas submetas;
5. se existe alguma regra, onde a meta unifica com sua conclusão;
6. se não é conhecido, porém questionável. Neste caso, questiona o usuário.

7.2.3 Fluxograma do Subsistema

A figura 7-3 mostra o subsistema de diagnóstico. Situa o sistema SERP, a base de conhecimentos SEDIF, os arquivos utilizados e as iterações entre ambos.

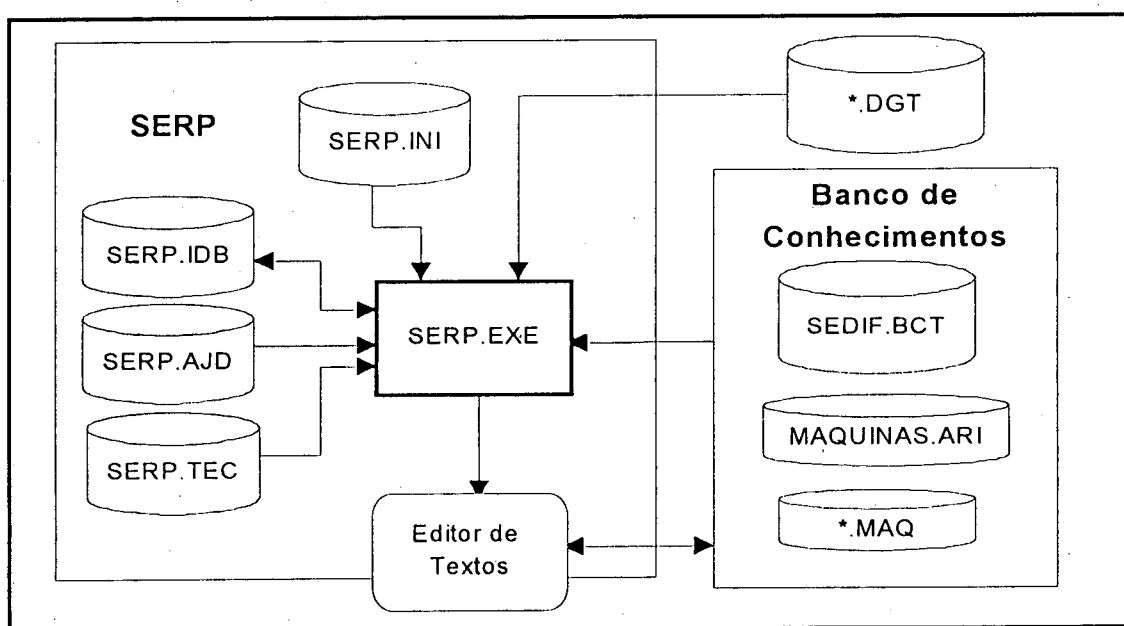


Figura 7-3. O Subsistema de Diagnóstico

Os arquivos de extensão 'dst', a saber, provenientes do subsistema de detecção de irregularidades já foram apresentados. Os demais serão descritos.

- SERP.EXE: programa executável do sistema. É o sistema esqueleto. Contém a máquina de inferência lógica que processa o conhecimento do banco, o interpretador SERP e o interpretador Prolog interno.
- SERP.INI: arquivo de comandos SERP/Prolog embutido para execução de comandos em lote, permitindo automatizar certos procedimentos de inicialização. Sua presença é opcional no sistema.
- SERP.IDB: banco de dados interno que acompanha o SERP. É automaticamente consultado ao início de cada sessão de trabalho. Pode ser modificado, gravado e reconsultado mediante predicados específicos. Nele podem ser armazenados e retirados fatos, cláusulas e registros. Pode-se inclusive gravar ali um banco de conhecimentos inteiro, em caráter permanente, evitando assim a necessidade de explicitar sua carga a partir de outros arquivos externos. Esta característica pode fazer de SERP um sistema autônomo, isto é, deixar de ser um sistema esqueleto para passar a ser caracterizado como um sistema especialista completo.
- SERP.AJD: arquivo texto de ajuda em linha. Contém descrições gerais organizadas por tema. Durante uma sessão SERP, o comando 'ajuda.' permite acesso às informações deste arquivo.
- SERP.TEC: arquivo para geração de macros de digitação, definidas sobre teclas funcionais e combinações de teclas. Seu teor é uma tabela de códigos de rastreamento de teclas (ou combinação de teclas) e correspondente cadeia de caracteres a ser gerada.

Os seguintes arquivos fazem parte da base de dados.

- SEDIF.BCT: contém as regras, fatos e metafatos utilizados no banco de conhecimentos, e também cláusulas Prolog que constituem macro-procedimentos disponíveis como submetas de regras SEDIF. Os macro-procedimentos criados desempenham tarefas como de cálculo, procedimentos recursivos e localização de informações, livrando o usuário do acompanhamento de detalhes muito especifi-

cos, pois o estabelecimento da meta é justificado na janela de acompanhamento do raciocínio como 'devido ao sistema'. A não-utilização de macros necessitaria ser substituída por entradas substitutivas na base de conhecimentos, que pode ocasionar eventuais perdas de visão do contexto.

- **MAQUINAS.ARI**: arquivo contendo cláusulas e predicados Prolog para cadastrar/recadastrar informações a respeito de máquinas na fiação da empresa. Este arquivo é lido uma única vez, e suas cláusulas são gravadas no arquivo **SERP.IDB**, após o cadastramento, dispensando assim a necessidade de acessos posteriores a este arquivo.
- ***.MAQ**: arquivos de descrição formal das máquinas distintas que integram o ambiente produtivo na fiação, na forma de fatos Prolog. '*' substitui nomes de arquivos de máquinas. Estes arquivos são lidos por predicados específicos do arquivo **MAQUINAS.ARI**. Após o cadastramento das máquinas, procede-se à inclusão deste cadastro ao banco **SERP.IDF**, evitando sua reconstrução em sessões posteriores do sistema.

CAPÍTULO 8

8. APLICAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

8.1 A Empresa

A empresa escolhida para efetuar a aplicação denomina-se Hering Têxtil. Sua matriz fica situada no município de Blumenau, estado de Santa Catarina. As seções que seguem apresentam a empresa, características de sua fiação, a maquinaria em operação e os procedimentos adotados para a obtenção dos espectrogramas normais.

8.1.1 Histórico e Descrição

A Hering Têxtil foi fundada em 1880 por dois imigrantes alemães, Hermann e Bruno Hering. Surgiu nos primórdios do processo de industrialização brasileira, caminhou com ele, e, numa certa medida, antecipou conquistas importantes. A história dos primórdios da empresa, dentro do processo de colonização e industrialização do Vale do Itajaí, é relatada pela historiadora Maria L. Renaux HERING em [HER87].

Foi uma das primeiras empresas do setor têxtil a produzir o próprio fio de algodão, substituindo-o, já em 1914, pelo fio importado. Todo o progresso da Hering teria sido impossível se a empresa não tivesse atingido essa autonomia antes do conflito da I Guerra Mundial, pois muitas malharias tiveram então suas atividades interrompidas por obstáculos à importação. Em 1919, a empresa recebeu os benefícios da energia elétrica, com a qual passou a suprir o seu setor industrial, propiciando maior potência às operações fabris [LAG90].

Adotando uma filosofia empresarial avançada voltada para a valorização do trabalho e a atualização permanente do seu parque industrial, a Hering passou por sucessivas etapas no seu processo de crescimento, chegando aos dias de hoje com marcas e produtos de prestígio, 11 unidades fabris implantadas e uma liderança em seu segmento de mercado. Ocupa o segun-

do lugar mundial e o primeiro lugar na América Latina no setor têxtil [LAG90]. Nos seus dois complexos industriais - sul e nordeste - são fabricadas mais de 144 milhões de peças por ano [LAG90], num sistema de produção integralmente verticalizado: o algodão entra na forma bruta e sai transformado em criações que vão satisfazer as exigências de milhões de consumidores por uma moda atual e de alto padrão de qualidade.

Na década de 70 a Hering estende o fio da meada e vai se instalar no nordeste, aproveitando os incentivos fiscais da SUDENE. A Hering Nordeste opera como uma unidade completa, integrada por fiação, malharia, beneficiamento e confecção, contribuindo para modernizar a infra-estrutura industrial da região e ampliar o mercado de trabalho.

A Hering Têxtil gera emprego para mais de 19.000 pessoas que trabalham num complexo industrial moderno, dotado de equipamentos de última geração. Seus consumidores, além do Brasil, encontram-se espalhados em mais de 40 países.

Os dados de 1990, divulgados pela Revista Exame, apontam para um faturamento superando a casa dos US\$ 2 bilhões, que lhe valeu a 16ª posição dentre os grupos em operação no Brasil e a quarta dentre os de capital nacional [CUN92]. Em 1992 o grupo implantou uma fábrica na Espanha para participar do comércio com acesso à Comunidade Comum Européia.

Possui fiação open-end e convencional, esta última produzindo o fio cardado e o fio penteado. Os fios vindos da fiação são armazenados no depósito e seguem para a malharia quando forem solicitados através do sistema kanban. O consumo da malharia é de 50 ton/dia, e aproximadamente 50% dos fios consumidos na malharia da Hering são de fabricação própria. Os outros 50% são comprados de fornecedores externos.

O algodão comprado pela empresa-alvo é classificado em 4 variedades, de acordo com a procedência e classificação técnica. A classificação técnica leva em consideração as seguintes características físicas: porcentagem de impurezas, comprimento da fibra, maturidade/finura e resistência. A tabela 8-1 resume algumas características do algodão comprado.

| Variedade | Procedência | Comprimento da fibra (mm) | Maturidade (micronaire) |
|------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| MOCO-SERIDÓ | Norte | 31,75-34,90 | 3,2-3,8 |
| SERTÃO | Norte | 26,19-26,98 | 3,5-3,7 |
| MATA | Norte | 23,80-25,40 | 3,7-4,4 |
| LAC | Paulista-Sul | 26,19-26,98 | 3,2-4,0 |

Tabela 8-1 Classificação da variedade de algodão comprado

Dos fardos de algodão recebido, amostras são extraídas e remetidas para a Fundação Blumenauense de Estudos Têxteis para as análises de qualidade do fio. Após estas análises, os fardos de algodão são classificados e empilhados. Como entre os fardos existem variações de qualidade, é necessário fazer a mistura com um grande número de fardos para que os fios produzidos tenham sempre as mesmas características quanto à título, uniformidade, resistência e aparência.

O Laboratório de Ensaio Físicos da Fiação da Hering utiliza atualmente o regularímetro Uster Tester III. Os regularímetros produzidos pela Uster, durante suas diversas gerações estão documentados em manuais como [UST78], [UST81] e [UST89].

8.1.2 A Maquinaria da Fiação

A fiação da empresa-alvo localizada em Blumenau dispunha, em meados de 1993, da capacidade produtiva instalada apresentada na tabela 8-2.

| Máquina | Fabricante | Quantidade |
|--------------------------|-------------|------------|
| abridores e misturadores | Trutzschler | 11 |
| batedores | Trutzschler | 6 |
| cardas | Ingolstadt | 42 |
| | Textima | 18 |
| | Crosrol | 2 |
| reunideiras | Rieter | 3 |
| | Textima | 3 |
| laminadeiras | Rieter | 3 |
| pentecadeiras | Platts | 10 |
| | Textima | 4 |
| passadeiras | Ingolstadt | 18 |
| | Fasa Zinser | 4 |
| maçaroqueiras | Ingolstadt | 13 |
| | Textima | 4 |
| filatórios | Ingolstadt | 63 |
| | Itamasa | 28 |

Tabela 8-2. Capacidade produtiva instalada em 1993

As características apresentadas na tabela 8-3 provém de um levantamento de informações realizadas junto ao plano de órgãos da maquinaria produtiva em operação na empresa-

alvo, informações técnicas de produção e cálculos de estiragem. Para as passadeiras, máquinas específicas são destinadas à primeira passagem e à segunda passagem. Já nos filatórios, as mesmas máquinas são utilizadas para produzir fios cardados e penteados de diferentes títulos, procedendo-se uma simples troca de órgãos para diversificar os títulos. Nos filatórios, a nomenclatura para identificação, na coluna de estiragem mecânica, usa o formato xx/My, onde xx é substituído pelo valor do título, em tex, e y designa o processo: C (cardado) ou P (penteado), de acordo com os produtos.

| Máquina | Fabricante | Núm. Orgãos | Números das máquinas (/ fusos) | Estiragem Mecânica |
|--------------|-------------------|-------------|---|--|
| CARDA | Ingolstadt | 66 | 01-42 | 39,930 |
| | Cros-Rol | 65 | 43-44 | 147,438 |
| | Textima | 74 | 45-62 | 87,7089 |
| REUNIDEIRA | Textima | 26 | 01-03 | 1,097 |
| | Ricter | 45 | 05,07,09 | 1,689 |
| LAMINADEIRA | Ricter | 36 | 04,06,08 | 5,617 |
| PENTEADEIRA | Ricter | 63 | 15-30 | 6,054 |
| | Platts-Century | 67 | 1,2,3,5,7,9,11-14 | 5,944 |
| PASSADEIRA | Ingolstadt | 31 | 06,08,10,12,14,16 05,07,09,11,13,17 | 1ª pass.: 7,625 2ª pass.: 6,759 |
| | Fasa-Zinser | 39 | 20,22 19,21 | 1ª pass.: 7,785 2ª pass.: 5,794 |
| MAÇAROQUEIRA | Ingolstadt | 68 | 01-11,16,17 / 96 | 7,7167 |
| | Textima | 67 | 12-15 / 120 | 6,8900 |
| FILATÓRIO | Itamasa-Fioro | 36 | 01-22 / 384 71-76 / 436 | 20/MP: 31,349 25/MP: 25,079 25/MC: 26,647 30/MC: 22,511 |
| | Ingolstadt-Sucsen | 35 | 23-45 / 396 46-70 / 1720 77-91 / 1720 | 20/MP: 31,573 25/MP: 25,564 25/MC: 27,044 30/MC: 22,725 |

Tabela 8-3. Características do maquinário em operação

Os filatórios podem ser ajustados para produzir fios de diferentes títulos, assim como passadeiras podem ser também ajustadas para primeira e segunda passagem, mediante a simples troca de alguns órgãos. Estes são engrenagens, normalmente denominados de contra-

pinhão, pinhão de estiragem, entre outros. Sua troca muda a relação entre as velocidades dos cilindros no trem de estiragem.

A tabela 8-4 apresenta os títulos de saída em cada máquina nos processos penteado e cardado. Junto com as informações de estiragem mecânica, os títulos permitem calcular a taxa de resíduo ou desperdício.

| Máquina | Penteado | Cardado |
|----------------|-----------------|----------------|
| Batedor | 465.000 | 465.000 |
| Carda | 4.540 | 4.540 |
| Reunideira | 60.000 | inexiste |
| Laminadeira | 60.000 | inexiste |
| Penteadeira | 4.540 | inexiste |
| Passadeira | 4.540 | 4.540 |
| Maçaroqueira | 590,5 | 630 |
| Filatório | 20/25/30 | 25/30 |

Tabela 8-4 Títulos de saída por máquina

8.1.3 Obtenção dos Espectrogramas Normais

Os espectrogramas normais resultaram de um levantamento estatístico preliminar de todas as curvas normais necessárias para qualquer tipo de teste, dentro da fiação da empresa-alvo. A empresa fornecedora de regularímetros recomenda que cada cliente confeccione suas próprias curvas normais, com base no argumento de que estas variam de acordo com a planta industrial de cada fiação, o que impede a elaboração de curvas normais padronizadas.

Os técnicos do Laboratório de Ensaios Físicos, por sua vez, não haviam elaborado até a data deste levantamento das curvas normais. O método empregado pelos técnicos têxteis, para efetuar a análise de irregularidades, consistia de um reconhecimento visual de picos de excessos sobre um traçado da curva normal imaginado de acordo com o comportamento de amplitudes em canais vizinhos, desde que se considerava o comportamento vizinho aproximadamente normal, além de valer-se de julgamentos e conhecimentos baseados na sua experiência. Esta forma tosca de elaboração da curva em momento de análise impossibilitou a obtenção de uma curva normal adequadamente confiável.

Limitações de tempo não permitiram a elaboração de curvas normais muito precisas, pois na época de sua realização do levantamento, a empresa-alvo ainda não havia ainda adqui-

rido a interface serial assíncrona que possibilita a leitura direta via porta serial. Assim, o levantamento preliminar foi efetuado a partir cópias ampliadas de curvas registradas em papel, em número de 6 a 12 amostras para cada curva normal distinta possível. A técnica consistia na obtenção de medidas aproximadas com auxílio de um escalímetro. A metodologia utilizada para obter a curva normal, sugerida pelos técnicos têxteis especializados, foi a determinação da curva envoltória inferior das amostras para cada caso, baseado na crença de que a menor amplitude de irregularidade observada para cada canal deve representar razoavelmente o comportamento normal do equipamento em operação. Variações mais grotescas foram suavizadas por proceder-se a um ajuste interpolador visual, com auxílio de técnicos do laboratório.

O levantamento resultou na estimação de 17 espectrogramas normais distintos, de acordo com suas características diferenciadoras básicas (tabela 8-5).

| Núm. | Especificações de Proveniência do Material Analisado | | | | |
|------|--|------------------------|------------------------------------|----------------|--------------------|
| | Máquina | Números | Fabricante | Processo | Passagem / Título |
| 1 | Carda | 1-42 43-44 45-62 | Ingolstadt Cross-Rol Textima | | |
| 2 | Pentcadeira | 1,2,3,5,7,9,11-14 | Platts | Pent. | |
| 3 | Pentcadeira | 4,6,8,10 | Textima | Pent. | |
| 4 | Pentcadeira | 15-30 | Rieter | Pent. | |
| 5 | Passadeira | 6,8,10,12,14,16 | Ingolstadt | Card. | Pasg=1 |
| 6 | Passadeira | 5,7,9,11,13,17 | Ingolstadt | Card. | Pasg=2 |
| 7 | Passadeira | 6,8,10,12,14,16 | Ingolstadt | Pent. | Pasg=1 |
| 8 | Passadeira | 5,7,9,11,13,17 | Ingolstadt | Pent. | Pasg=2 |
| 9 | Passadeira | 20,22 | Fasa | Card. | Pasg=1 |
| 10 | Passadeira | 19,21 | Fasa | Card. | Pasg=2 |
| 11 | Maçaroqueira | 1-11,16,17 12-15 | Ingolstadt Textima | Card. Card. | |
| 12 | Maçaroqueira | 1-11,16,17 12-15 | Ingolstadt Textima | Pent. Pent. | |
| 13 | Filatório | 1-22,71-76 23-70 | Itamasa Ingolstadt | Card. Card. | Tit.=25 Tit.=25 |
| 14 | Filatório | 1-22,71-76 23-70 | Itamasa Ingolstadt | Card. Card. | Tit.=30 Tit.=30 |
| 15 | Filatório | 1-22,71-76 23-70 | Itamasa Ingolstadt | Pent. Pent. | Tit.=20 Tit.=20 |
| 16 | Filatório | 1-22,71-76 23-70 | Itamasa Ingolstadt | Pent. Pent. | Tit.=25 Tit.=25 |
| 17 | Filatório | 1-22,71-76 | Itamasa | Pent. | Tit.=30 |

Tabela 8-5. Relação dos espectrogramas normais na empresa-alvo

Os dados levantados destes espectrogramas constituíram os vetores iniciais da tabela SPCNormal do banco de dados usado pelo subsistema de detecção. Sua posterior atualização baseada nos testes incorporados pela recepção serial passa a ser um processo automatizado pelo sistema.

8.2 Resultados Estatísticos

Os indicadores de performance do subsistema de detecção e classificação da irregularidade deveriam idealmente apoiar-se em espectrogramas de testes realizados no Laboratório de Ensaaios Físicos. Estes deveriam suprir dados que atendessem a duas finalidades: (i) treinamento da rede neural e (ii) verificação da eficácia do treinamento pela apresentação de um outro conjunto de dados distinto do que foi usado para o treinamento.

Para que a rede atinja um alto grau de acerto mantendo sua robustez, faz-se necessário dispor de um grande volume de dados. Especialmente nos padrões mais complexos, onde as diferenças são muito sutis, torna-se necessário um reforço especial de aprendizagem - e isto ocorre com as irregularidades periódicas não-senoidais.

A não-disponibilidade de espectrogramas que apresentem estas formas de irregularidades em quantidade suficiente foi contornada através da alternativa de gerar espectrogramas simulados. Torna-se assim imprescindível gerar simulações que se aproximem do comportamento estocástico dos espectrogramas de testes da melhor forma possível.

Procedeu-se inicialmente a um estudo de determinação da distribuição estocástica das amplitudes das irregularidades nos diversos canais do espectrograma. Para tal, testes estatísticos foram realizados em espectrogramas disponíveis para passadeiras, maçarocadeiras e filatórios.

Serão detalhados os procedimentos dos testes para os espectrogramas de filatórios. Foram tomadas séries de amplitudes em espectrogramas nos canais 10, 15, 25, 35, 45 e 55 de um conjunto amostral de 100 espectrogramas apresentando apenas irregularidades normais. Para cada canal foram realizados testes não-paramétricos de aderência às distribuições qui-quadrado, gama, log-normal, normal e Weibull. Estas formam o conjunto básico de distribuições distintas e abrangentes usadas na Estatística.

Os resultados, apresentados na tabela 8-6, contém as medidas do qui-quadrado calculado $\chi^2_{\text{calc};n}$ (n representa o número de graus de liberdades) e a área da região à direita deste valor, $p = P[\chi^2_n \geq \chi^2_{\text{calc};n}]$.

| canal do espectr. | Qui-quadrado | | Gama | | Log-normal | | Normal | | Weibull | |
|----------------------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | χ^2_{calc} | p | χ^2_{calc} | p | χ^2_{calc} | p | χ^2_{calc} | p | χ^2_{calc} | p |
| 10 | 13,207 | 0,067 | 12,273 | 0,139 | 12,923 | 0,115 | 11,558 | 0,172 | 14,157 | 0,078 |
| 15 | 16,158 | 0,003 | 3,823 | 0,700 | 4,533 | 0,605 | 2,899 | 0,715 | 6,798 | 0,340 |
| 25 | 32,288 | 0,000 | 11,181 | 0,131 | 11,829 | 0,106 | 10,497 | 0,232 | 13,131 | 0,107 |
| 35 | 6,380 | 0,605 | 6,533 | 0,479 | 7,565 | 0,372 | 4,659 | 0,701 | 8,241 | 0,410 |
| 45 | 16,687 | 0,054 | 6,404 | 0,493 | 6,566 | 0,475 | 6,544 | 0,478 | 12,586 | 0,083 |
| 55 | 17,278 | 0,045 | 10,121 | 0,182 | 10,448 | 0,165 | 9,807 | 0,200 | 13,250 | 0,066 |

Tabela 8-6. Testes de aderência na dispersão da amplitude em espectrogramas

Verifica-se, em todas as linhas, um valor de qui-quadrado calculado para a distribuição normal inferior em relação às demais distribuições, o que evidencia um ajuste melhor a este modelo teórico de distribuição.

Para os testes de aderência à distribuição normal ao nível de significância $\alpha = P[\chi^2_n \geq \chi^2_{\text{crítico};n}]$ de 5% ou 10% ($\alpha = 0,05$ ou $0,10$), temos $p > \alpha$ e por conseguinte, $\chi^2_{\text{calc};n} < \chi^2_{\text{crítico};n}$, o que faz aceitar a hipótese de que a distribuição segue a curva normal aos níveis estipulados. A justificativa teórica fundamenta-se no Teorema Central do Limite [GIB73]. A amplitude total resultante deve ser a soma de um grande número de fatores aleatórios independentes.

Como os canais selecionados para os testes encontram-se estratificados entre todos os canais dos espectrogramas, foi assumida a distribuição normal para todos os canais.

A análise do valor médio do coeficiente de variação amostral $CV = s/\bar{x}$ permitiu constatar uma invariância aproximada de seu valor, independente do canal. Para os espectrogramas de filatórios, este valor encontra-se próximo a 0,1.

Para os testes realizados em espectrogramas de passadeiras e maçarqueiras, a melhor aderência à distribuição amostral também foi verificada, embora a dispersão tenda a aumentar à medida em que a etapa se distancie do final.

O programa **simula.exe** foi concebido para gerar simulações, permitindo:

- acrescentar perturbações aleatórias a um espectrograma normal de acordo com coeficientes CV selecionados⁶. Possui uma rotina geradora de números pseudo-aleatórios normais de média 0 e desvio-padrão s_i para esta distribuição, adicionando os valores gerados e discretizados em cada canal;
- acrescentar padrões de irregularidades ao espectrograma, em locais e intensidades à livre escolha;
- gravar a montagem no banco de dados para acesso posterior ao sistema **DIARF**.

As tabelas 8-7 e 8-8 apresentam alguns resultados estatísticos das simulações efetuadas. Em cada célula de cada uma das tabelas tomou-se uma amostra de 40 simulações, cada uma correspondendo a um espectrograma acrescido de uma irregularidade. As redes Feedforward (com e sem pré-processamento Fourier) foram previamente treinadas para reduzir os erros quadráticos médios computados na camada de saída para um valor próximo à 0,015.

A tabela 8-7 mostra algumas características de uma análise multivariada, onde se analisam três discriminadores importantes, dois valores de CV utilizados para gerar ruídos, e diversos tipos de padrões de irregularidades agrupados em duas categorias: na forma original e apresentando divisão de amplitude de um pico em dois canais adjacentes.

Embora MaxProd apresente um desempenho notadamente superior para os padrões sem divisão de pico, é notável sua desvantagem quando a divisão ocorre. Em algumas situações particulares MaxProd simplesmente falha na classificação em quase todos os casos. Fe-

⁶ Estes valores de CV são definidos pela razão σ_i/x_i , onde x_i é a amplitude normal do canal i , obtido a partir do espectrograma normal provisório cadastrado. A partir do CV, é possível determinar o desvio-padrão σ_i para cada canal i e gerar um número aleatório correspondente para simulação.

edforward sem ou com pré-processamento de Fourier possui mais estabilidade sob o aspecto de independência à classe de padrão que resulta. Pré-processamento Fourier parece apresentar no levantamento estatístico uma leve vantagem sobre a Feedforward sem pré-processamento, porém esta vantagem pode ser casuística.

| CV % | Classificador Neural | padrões sem divisão de pico | | | | | padrões com divisão de pico (1) | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------------|---------|----------------|----------------------|----------------|---------------------------------|---------|----------------|----------------------|
| | | seno | triang. | dente serra | impuls. +/- (0.9) | estira- gem | seno | triang. | dente serra | impuls. +/- (0.9) |
| 0,5 | Feedforward | 100,0 | 95,0 | 95,75 | 100,0 | 100,0 | 87,5 | 95,0 | 100,0 | 95,0 |
| 1,0 | | 65,0 | 55,0 | 60,0 | 60,0 | 100,0 | 45,0 | 37,5 | 60,0 | 45,0 |
| 0,5 | Pré-processamento Fourier | 100,0 | 97,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 95,0 | 90,0 | 100,0 | 95,0 |
| 1,0 | | 100,0 | 95,0 | 65,5 | 60,0 | 95,0 | 55,0 | 50,0 | 67,5 | 52,5 |
| 0,5 | MaxProd | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | (2) | (3) |
| 1,0 | | 87,5 | 75,0 | 92,5 | 60,0 | 97,5 | 75,0 | 70,0 | (2) | (3) |

(1) 40% do pico original máximo distribuído para o canal da esquerda

(2) classifica erroneamente como impulsos + com maior frequência

(3) classifica erroneamente como impulsos +/- com maior frequência

Tabela 8-7. Taxa de acerto percentual dos classificadores neurais

A tabela 8-8 procura salientar alguns aspectos de sensibilidade da medida de adequação da classificação corretamente realizada em relação à quantidade de ruído embutido, determinados pelo valor do CV.

| CV (ruídos) | discriminador neural adotado | | |
|----------------|------------------------------|---------|---------------------------|
| | Feedforward | Maxprod | Pré-processam. Fourier |
| 0,50 | 95,0 | 100,0 | 90,0 |
| 0,75 | 75,0 | 95,0 | 82,5 |
| 1,00 | 37,5 | 70,0 | 50,0 |
| 1,25 | 15,0 | 47,5 | 27,5 |

Tabela 8-8. Adequação média para a irregularidade onda triangular

8.3 A Base de Fatos do Maquinário

Doravante será apresentada a base de conhecimentos constituída. Nesta seção será descrita a base de fatos da maquinaria e as cláusulas que governam seu gerenciamento. A seção 8.4 descreve a base de conhecimentos SEDIF propriamente dita. Ambas as seções podem ser consideradas parte da documentação da base e servir para a realização de futuras revisões.

Este subsistema de diagnóstico é formado pelo ambiente de sistema especialista SERP e a base de conhecimentos denominada SEDIF: Sistema Especialista de Diagnóstico de Irregularidades na Fiação. Este último possui como domínio os fatos relativos à maquinaria da fiação mais o conhecimento do especialista em regulamentação na fiação têxtil, formalizado em regras de acordo com a sintaxe de representação do conhecimento de SERP.

O conhecimento necessário a uma consulta é classificado em permanente e pertinente a uma consulta, de acordo com o quadro 8-1.

| Tipo de Conhecimento | Natureza do Conhecimento | Fonte do Conhecimento | Formas de Representação |
|---------------------------|---|---|-----------------------------------|
| Permanente | Maquinaria | Planos de órgãos da maquinaria | Registros de tabela hash maquinas |
| | Regulamentação | Especialistas em regulamentação; manuais técnicos | Regras SEDIF |
| Pertinente à uma consulta | Irregularidades detectadas e dados das séries de testes | arquivos '*.dst' gerados pelo subsistema detecção | Fatos registrados |

Quadro 8-1. Conhecimento armazenado em SEDIF

Para formar a presente base de conhecimentos, torna-se necessário, a princípio, constituir uma tabela hash de máquinas disponíveis que é gravada na base de dados SERP.IDB. Esta fase preparatória normalmente é realizada apenas uma vez, sendo repetida apenas quando houver necessidade de recadastrar a maquinaria.

Será apresentada inicialmente a estrutura dos registros contidos nos arquivos *.MAQ. Posteriormente, uma descrição dos mecanismos de conversão em tabela hash será apresentada. A tabela hash apresenta a maior parte dos fatos necessários pela base de conhecimentos. Posteriormente serão apresentadas as macros Prolog utilizadas e o conteúdo da base

propriamente dita. A construção da base foi fundamentada no conhecimento especialista extraído de literatura técnica específica e entrevistas com os técnicos especialistas que atuam no Laboratório de Ensaio Físicos da indústria-alvo.

8.3.1 Cadastro Básico de Máquinas

Cada arquivo texto descritor de uma máquina, *.MAQ, é destinado a gerar uma categoria na tabela hash, e contém cláusulas com as estruturas apresentadas no quadro 8-2.

| Estrutura da cláusula | Exemplo | Quantas cláusulas |
|---|--|---|
| <i>maquina(cod_maqu,espécie,fabricante,oete,oste)</i> | maquina(filaingo,filatorio,'Ingolstadt Suessen',23,25) | 1 por categoria |
| <i>fio(cod_maqu,título,processo,lista-troca)</i> | fio(filaingo,20,penteado,[4/42,9/35,17/32, 18/47]) | só em filatório; 1 por possível par (<i>título, processo</i>) |
| <i>atual(cod_maqu,título,processo)</i> | atual(filaingo,20,penteado) | só em filatório; 1 |
| <i>motor(cod_maqu,num_id_orgao,rpm)</i> | motor(filaingo, 0,1850) | 1 por motor |
| <i>orgao(cod_maqu,num_id_orgao,descr-orgao , dim orgao)</i> | orgao(filaingo,3, 'Engrenagem', 62) | 1 por órgão relevante |
| <i>transm(cod_maqu,num_id_orgao 1, num id orgao 2, forma)</i> | transm(filaingo,1,2,correia) | 1 por transmissão |

Quadro 8-2. Estrutura das cláusulas em arquivos descritores de máquinas

Os argumentos mnemônicos representam:

- *cod_maqu*: código mnemônico da máquina. Este código será oportunamente usado para categorizar a máquina inteira dentro da tabela.
- *espécie*: nome da máquina, desde a carda até o filatório;
- *fabricante*: identificação do fabricante da máquina;
- *oete, oste*: qual é o número de identificação do órgão de entrada (oete) e de saída (oste) no trem de estiragem da máquina;
- *título*: número do título do fio, em tex;
- *processo*: penteado ou cardado;

- *lista-troca*: lista de termos da forma *num_id_orgao/dim_orgao*, contendo os códigos de órgãos de troca e a sua dimensão para aquele processo e título.
- *num_id_orgao*: número de identificação do órgão, um inteiro univocamente designado para representar cada órgão dentro da máquina;
- *rpm*: velocidade angular em rotações por minuto;
- *descr-orgao*: descrição textual sumarizada do órgão;
- *dim_orgao*: dimensão do órgão. Em engrenagens, número de dentes; em polias, seu diâmetro em centímetros;
- *forma*: forma de acoplamento entre dois órgãos. Pode ser *acopl* (acoplamento de engrenagens, inclusive eixo sem-fim), *axial* ou *correia*.

Os fatos *transm* devem abranger todos os órgãos cadastrados, e necessariamente referir-se apenas a estes. O primeiro número identificador refere-se ao órgão motor, e o segundo refere-se ao órgão movido.

8.3.2 A Tabela Hash da Maquinaria

Tabelas hash são maneiras de classificar registros sob categorias específicas. Usam como técnica o armazenamento de um registro sob uma determinada categoria, que é usada como chave de acesso na pesquisa. Pesquisas envolvendo estes registros são eficientes para grandes volumes de dados, porque a categoria, sendo especificada, limita a pesquisa a seus registros a um contexto e ignora os registros de outras categorias. A organização das informações da maquinaria é adequada para esta forma de armazenamento e recuperação, destinando-se cada máquina disponível a uma categoria.

Durante uma sessão de consulta, SEDIF irá efetuar a pesquisa de fatos sobre a maquinaria disponível numa tabela hash contida em sua base de dados. Esta tabela hash possui o nome *maquinas*, e suas categorias possuem o nome referente ao código mnemônico da máquina. O acesso às informações utiliza duas referências de localização: o nome da tabela hash e o nome da categoria. A tabela hash *máquinas* já estará disponível no momento da carga do programa SERP, pois está presente na base de dados.

Os registros armazenados nas categorias armazenam termos de estrutura similar às cláusulas contidas nos arquivos do cadastro básico *.MAQ. As diferenças são as seguintes. Como cada categoria é identificada pelo código da máquina, não se faz necessário mencionar *cod_maqu* como argumento nos registros da categoria, de forma que em nos termos registrados este argumento foi suprimido. No predicado *maquina* foi acrescentada a estiragem mecânica provocada no trem de estiragem - passando a ser *maquina(especie, fabricante, oete, oeste, estiragem)*. No predicado *orgao* foram acrescentados dois parâmetros: um contendo a velocidade angular do órgão em RPM, e outro contendo o comprimento de onda do órgão - passando a ser *orgao(num_id_orgao, descr_orgao, dim_orgao, rpm, compr_onda)*.

O arquivo Prolog MAQUINAS.ARI contém cláusulas para consultar os fatos contidos nos arquivos de cadastro básico *.maq, converte-los em correspondentes registros de tabela hash, categorizados por máquina, e posteriormente eliminar as cláusulas já não mais necessárias (figura 8-1).

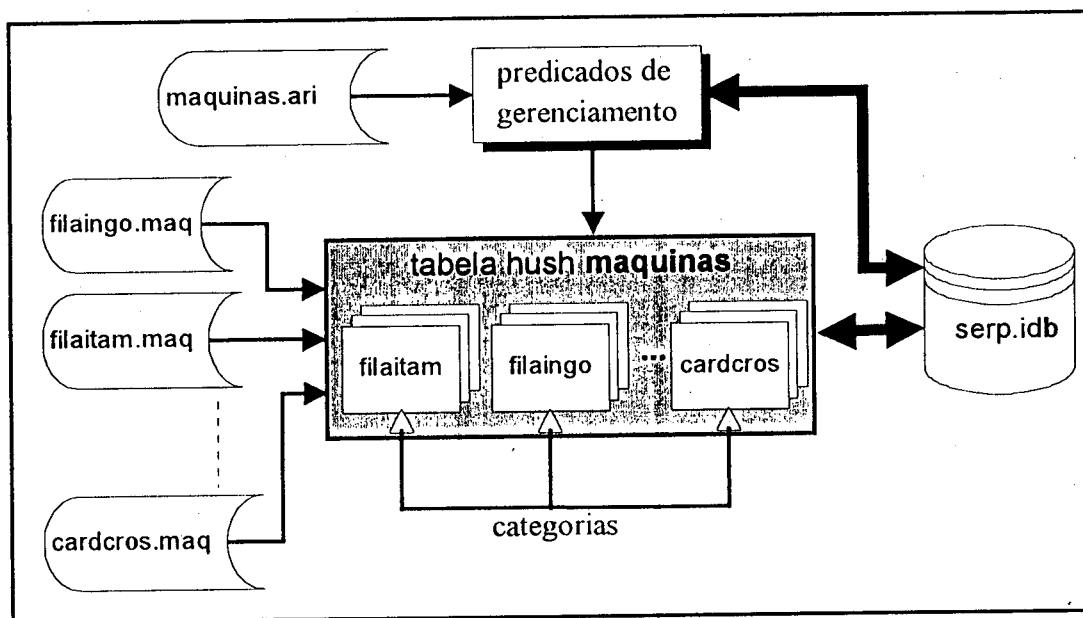


Figura 8-1. Conversão do cadastro básico de máquinas para tabela hash

Arity Prolog oferece predicados básicos para gerenciar registros de tabela hash, a saber, para criar, acessar, modificar e delir registros ou a tabela inteira de uma vez, incorpora-

dos em SERP. O arquivo Prolog MAQUINAS.ARI disponibiliza predicados principais e secundários, especificamente construídos para efetuar o gerenciamento da tabela hash **maquinas**.

O mais básico, e que normalmente é suficiente, é o predicado *monta_tudo*, que cria a tabela hash **maquinas** na memória de trabalho. O usuário, porém, é responsável em salvar posteriormente a tabela e, eventualmente os predicados carregados de MAQUINAS.ARI para o banco de dados em arquivo de disco. Todas as cláusulas, registros, tabelas hash e árvores B-tree presentes na memória de trabalho são salvas para o banco de dados em disco SERP.IDB mediante o predicado *save*.

O quadro 8-3 apresentada uma relação dos predicados principais.

| Predicado | Descrição |
|---|--|
| <i>monta_tudo</i> | Obtém a lista dos arquivos contidos na cláusula única <i>lista_arquivos(+Lista)</i> . Cada membro da lista é convertido num nome de arquivo, anexando-se a extensão <i>maq</i> , e <i>le_e_registra/1</i> irá ler este arquivo e registrar as cláusulas dentro da categoria adequada da tabela <i>maquinas</i> . Ao final, é exibida a lista de todos os códigos de máquina registrados. Arquivos não encontrados ou com erros não interrompem a continuidade do processo, apenas geram uma mensagem relatando a natureza do problema. |
| <i>quais_CodMaqu(-Lista)</i> | Retorna uma lista de todos os códigos de máquinas registrados na tabela hash |
| <i>lista_maquina(+CodMaqu)</i> | Imprime em tela um relatório contendo todas as informações da categoria. Caso se deseje saída em arquivo ou impressora, pode-se redirecionar a saída com auxílio do predicado <i>stdout/2</i> |
| <i>troca_orgaos(+CodMaqu, +Titulo, +Processo)</i> | Pode ser bem-sucedido em filatórios apenas. Neste caso, <i>fio(+Titulo, +Processo, +Lista)</i> fornece a lista de órgãos de troca, usada pelo predicado <i>substitui_dim_orgaos(+CodMaqu, +Lista)</i> para efetuar a troca de órgão. Posteriormente, <i>calcula(+CodMaqu)</i> é chamado para recalcular os valores dependentes dos órgãos. O registro <i>atual(+Titulo, +Processo)</i> é modificado para os novos valores |
| <i>removeallh(maquinas)</i> | Para delir a tabela hash <i>maquinas</i> inteira. Este predicado é do próprio Prolog embutido |

Quadro 8-3. Predicados para gerenciamento da tabela *maquinas*

8.4 O Banco de Conhecimentos

Esta seção tem por objetivo apresentar entradas do banco de conhecimentos gravados em arquivo sob o nome de SEDIF.BCT. Devido ao encadeamento característico na representação de conhecimento através de regras de produção, é possível estruturar os componentes sob forma de grafo orientado ou mesmo árvore.

O arquivo está subdividido em seções. A sequência de apresentação das entradas segue estas seções. Primeiro serão descritas as partes mais elementares: o fatos utilizados. A seguir, as cláusulas Prolog que constituem os macro-procedimentos não-justificados no acompanhamento do raciocínio. Por último, as regras SEDIF.

Cada entrada será apresentada seguida de um comentário a seu respeito. Ocasionalmente, quando houver necessidade de maiores esclarecimentos, variáveis são precedidas por um símbolo '+' ou '-'. O símbolo '+' denota que a variável deve estar instanciada no momento em que a entrada for disparada pelo processo de inferência, e o símbolo '-' denota que a variável deve estar não-instanciada, ou livre, passando a ficar instanciada quando a meta for bem sucedida.

8.4.1 Metafatos e Fatos

Entrada:

meta = diagnostico.

Comentário: o metafato iniciar começa a sessão por esta meta.

Entrada:

prefixo = todos.

Comentário: metafato que define o nome de predicado para uso em regras onde todas soluções devem ser encontradas por retrocesso.

Entradas:

procl:sequencia_processo(penteado) = [filatorio, macaroeira,passadeira/2, passadeira/1, penteadeira, laminadeira, reunideira,carda].

proc2: sequencia_processo(cardado) = [filatorio, macaroqueira, passadeira/2, passadeira/1, carda].

Comentário: definem em listas as máquinas que fazem parte dos processos produtivos que culminam em fio penteado e fio cardado.

Entradas:

onda0: forma_onda(0) = seno.

onda1: forma_onda(1) = triangular.

onda2: forma_onda(2) = 'dente-de-serra'.

onda3: forma_onda(3) = 'impulsos + e -'.

onda4: forma_onda(4) = 'impulsos +'.

onda5: forma_onda(5) = estiragem.

Comentário: estes fatos associam os valores numéricos de codificação do padrão de irregularidade, como presentes nos fatos gravados em arquivos '*.dst', de entrada, ao valor simbólico descritivo correspondente.

Entradas:

fator1: fator_escart(filatorio) = 2.75.

fator2: fator_escart(macaroqueira) = 3.50.

fator3: fator_escart(passadeira/1) = 4.00.

fator4: fator_escart(passadeira/2) = 4.00.

fator5: fator_escart(penteadeira) = 4.00.

Comentário: quando a irregularidade detectada for classificada como sendo uma onda de estiragem, estes fatos auxiliam na determinação do comprimento médio da fibra, relacionados à secção de escartamento, para fornecer um diagnóstico mais localizado.

Entrada:

limit: compr_fibra(min = 2.0,max = 3.5).

Comentário: os valores numéricos presentes apresentam os comprimento mínimo e máximo de uma fibra, para limitar a pesquisa de máquinas responsáveis quando detectada uma onda de estiragem.

Entradas:

diagn01: diagn(seno,excentrico) =

\$Causa pode ser orgao excentrico. A cada volta completa, o orgao gera uma onda de irregularidade. Provaveis orgaos abaixo relacionados\$.

diagn02: diagn(seno,ovalado) =

\$Causa pode ser orgao ovalado. A cada volta completa, o orgao gera duas ondas de irregularidade. Provaveis orgaos abaixo relacionados\$.

diagn03: diagn(triangular,filat) =

\$Variacao de tensao simetrica do fio devido a movimento reverso na bobina do filatorio\$.

diagn04: diagn(triangular,trem) =

\$Sujeira/jogo de movimento dos elementos do trem de estiragem\$.

diagn05: diagn('dente-de-serra',filat) =

\$Variacao de tensao assimetrica do fio com movimento reverso na bobina do filatorio\$.

diagn06: diagn('dente-de-serra',trem) =

\$Sujeira/dano nos cilindros do trem de estiragem\$.

diagn07: diagn('impulsos + e -',filat) =

\$Sujeira ou poeira no encaixe do rotor do filatorio open-end\$.

diagn08: diagn('impulsos +',filat) =

\$Defeito na juncao do manchao superior do filatorio\$.

diagn09: diagn(estiragem,escart) =

\$Falha pode ter ocorrido na secao de escartamento devido a uma ma ajustagem dos cliques, responsaveis pela pressao do escartamento. Provaveis maquinas de origem da falha a seguir relacionadas\$.

diagn10: diagn(estiragem,trepid) =

\$Inadequado isolamento entre maquinas, causando interferencia devido a trepidacoes transmitidas pela base de fixacao\$.

diagn99: diagn(ausencia) =

\$Nao ha regra no banco sedif para esta irregularidade\$.

Comentário: os fatos vinculam explicações textuais a cada classe de irregularidade e uma possível causa.

Entradas:

exces1: diagn_excesso(baixo) =

\$A altura do pico nao superou 50% da amplitude normal. Considere a possibilidade de casuismo sem irregularidade ou de que a aparencia final nao ser muito afetada por irregularidade fraca\$.

exces2: diagn_excesso(alto) =

\$A altura do pico superou a 50% da amplitude normal. A probabilidade de que a aparencia do produto final seja negativamente afetada e' alta. As causas de irregularidade devem ser investigadas, se curvas normais confiaveis\$.

adequ1: diagn_adequacao(baixo) =

\$A adequacao para a forma de onda diagnostica indica baixa correlacao. Pode: (i) haver sobreposicao de irregularidades na faixa de onda; ou (ii) forma de onda desconhecida; ou (iii) curva normal nao haver sido ainda adequadamente ajustada\$.

adequ2: diagn_adequacao(medio) =

\$Adequacao para a forma de onda diagnostica indica media correlacao. Se alto excesso sobre a onda normal, considere os diagnosticos apontados como significativos. Baixo excesso pode ser casuistico ou quadro confuso\$.

adequ3: diagn_adequacao(alto) =

\$Adequacao para a forma de onda detectada indica forte correlacao. Alta probabilidade de que a irregularidade detectada nao seja casuistica, desde que excesso significativo. Diagnosticos apontados devem ser seriamente considerados\$.

Comentário: os fatos vinculam explicações textuais a cada classe de excesso sobre o espectrograma normal e adequação da irregularidade à sua classe, como classificado.

8.4.2 Cláusulas Prolog

Entrada:

abre_arquivo(-H) :- listadir(\$*.dst\$),

exiba([nl,\$Nome do arquivo de diagnosticos ? \$]),


```
read(Nome), concat([Nome,$.dst$],Arqu), open(H,Arqu,r), !.
```

Comentário: lista o diretório contendo arquivos *.dst, solicita digitação do nome do arquivo (sem extensão), e abre o arquivo. Falha se não consegue abrir o arquivo. Retorna manipulador do arquivo aberto, caso sucesso.

Entrada:

```
le_serie(+H) :- obtem_termo(H,T), inicio_serie(T), recordz(serie,T,_), le_termos_serie(H).
```

Comentário: Obtém um termo Prolog válido T a partir do arquivo aberto de manipular H. Testa se é início de série e, caso sim, registra o termo e le os demais termos da série até o fim da série. O quadro 8-4 mostra um exemplo de uma série de testes lida e registrada. Neste constam dois testes, cada qual com duas irregularidades detectadas e classificadas.

```
serie = 1
data = 13 / 12 / 94
hora = 9 : 42
maquina = filatorio
fabr = ingolstadt
proc = cardado
tit = 25
irregular(teste(1),padrao(0),excesso(0.667),adequacao(0.512),canal(58))
irregular(teste(1),padrao(1),excesso(0.579),adequacao(0.501),canal(54))
irregular(teste(2),padrao(5),excesso(0.789),adequacao(0.71),canal(48))
irregular(teste(2),padrao(3),excesso(0.551),adequacao(0.677),canal(36))
```

Quadro 8-4. Série de testes registrada pelo predicado le_serie

Entradas:

```
obtem_termo(+H,-T) :- le_linha(H,L), string_term(L,T), nonvar(T).
```

```
le_linha(+H,-L) :- repeat, ifthenelse(read_line(H,L),true,(!,fail)).
```

```
le_termos_serie(H) :- obtem_termo(H,T), analise(T), fim_serie(T).
```

```
analise(+T) :- combina(T), recordz(serie,T,_), !.
```

```
analise(+T).
```

```
combina(serie = _).
```

```
combina(data = _).
```

```
combina(hora = _ : _).
```

```

combina(maquina = _).
combina(fabr = _).
combina(proc = _).
combina(pasg = _).
combina(tit = _).
combina(irregular(_,_,_,_)).
inicio_serie(serie = X) :- integer(X).
fim_serie(fimserie).

```

Comentário: conjunto de predicados utilizados por obtém_termo para leitura, identificação de início e fim de cada série de testes, análise de cada termo lido para, caso sua sintaxe o qualifique como termo a ser registrado, este procedimento de registro seja efetivado.

Entradas:

codigo_maquina = CodMaqu :-

```

    recorded(serie,maquina = passadeira,_),
    recorded(serie,pasg = N,_), recorded(serie,fabr = F,_),
    retrieveh(maquinas,CodMaqu,maquina(passadeira/N,F,_,_)), !.

```

codigo_maquina = CodMaqu :-

```

    recorded(serie,maquina = filatorio,_), recorded(serie,fabr = F,_),
    recorded(serie,tit = Titulo,_), recorded(serie,proc = Processo,_),
    retrieveh(maquinas,CodMaqu,maquina(filatorio,F,_,_)),
    troca_orgaos(CodMaqu,Titulo,Processo), !.

```

codigo_maquina = CodMaqu :-

```

    recorded(serie,maquina = M,_), recorded(serie,fabr = F,_),
    retrieveh(maquinas,CodMaqu,maquina(M,F,_,_)), !.

```

Comentário: as três cláusulas permitem recuperar o código da maquina de acordo com as informações presentes na série de testes registrada (por leitura prévia da série). O código é obtido a partir da tabela hash do maquinário registrado. A primeira cláusula aplica-se à passadeira, devido à uma particularidade específica: a necessidade de vincular a passagem. A segunda aplica-se para o filatório, que considera o título do fio para eventualmente, mediante o predicado troca_orgaos, proceder a uma troca de órgãos do filatório, recalculando as velocidades angula-

res os comprimentos de onda dos órgãos, e a estiragem do filatório. A terceira cláusula aplica-se aos demais casos.

Entrada:

processo = -P :- recorded(serie,proc = P,_), !.

Comentário: recuperar o nome do processo registrado na série de testes.

Entrada:

irregular(teste(T),padrao(P),excesso(E),adequacao(A),canal(C)) :-

recorded(serie, irregular(teste(T), padrao(P), excesso(E), adequacao(A),
canal(C)), Ref).

Comentário: recuperar uma irregularidade registrada na série de testes.

Entradas:

limites_onda_canal(Canal) = valores(LimInf,LimSup) :-

Inicio is Canal - 0.5,

compr_onda(Inicio) = LimInf,

Fim is Canal + 0.5,

compr_onda(Fim) = LimSup.

compr_onda(Canal) = X :-

number(Canal), X is 1000 * 2^(0.2*Canal - 10).

Comentário: limites_onda_canal(+Canal) = valores(-LimInf,-LimSup) recebe o número do canal e retorna valores de limites da faixa de comprimentos de onda abrangidos por este canal, em centímetros. Usa para tal a cláusula compr_onda(+Canal) = -X, onde Canal deve estar instanciado para o número do canal do regularímetro. Esta última cláusula retorna em X o comprimento de onda correspondente ao ponto médio do canal.

Entradas:

lista_orgaos_suspeitos(CodMaqu,LimInf,LimSup) = Lista :-

bagof(NumIdOrgao,orgao_suspeito(CodMaqu,LimInf,LimSup) =
NumIdOrgao,Lista), !.

lista_orgaos_suspeitos(CodMaqu,LimInf,LimSup) = [].

orgao_suspeito(CodMaqu,LimInf,LimSup) = NumIdOrgao :-

 retrieveh(maquinas, CodMaqu,orgao(NumIdOrgao, Descr, Dim, RPM,
 ComprOnda)),

 LimInf =< ComprOnda,

 ComprOnda =< LimSup.

Comentário: lista_orgaos_suspeitos(+CodMaqu,+LimInf,+LimSup) = -Lista coleta todos os números de identificação de órgãos na máquina CodMaqu, que geram ondas de irregularidade entre LimInf e LimSup e os retorna na Lista. Para a coleta usa o predicado orgao_suspeito(+CodMaqu,+LimInf,+LimSup) = -NumIdOrgao, que retorna em NumIdOrgao, através de retrocesso, o número de identificação do órgão componente da máquina de código CodMaqu que gera uma onda de irregularidade situada entre LimInf e LimSup.

Entrada:

maquina(CodMaqu) = Maqu :-

 retrieveh(maquinas,CodMaqu,maquina(Maqu,Fabr,_,_,Estiragem)).

Comentário: maquina(?CodMaqu) = ?Maqu: associa tipo de maquina com seu código, como cadastrado na tabela hash maquinas.

Entrada:

lista_demais(CodMaqu,[CodMaqu|Resto]) = [CodMaqu|Resto] :- !.

lista_demais(CodMaqu,[_|Resto]) = ListaS :-

 lista_demais(CodMaqu,Resto) = ListaS.

Comentário: CodMaqu deve ser um código de máquina dentro da lista instanciada ListaE, para que o predicado seja bem-sucedido. Neste caso, a cláusula retorna em ListaS a sublista à direita de ListaE, encabeçada por CodMaqu.

Entrada:

estiragem(CodMaqu) = Estiragem :-

 retrieveh(maquinas,CodMaqu,maquina(Maqu,Fabr,_,_,Estiragem)).

Comentário: retorna em Estiragem o valor da estiragem mecânica causada pela operação da máquina de código CodMaqu.

Entrada:

limites_resto(LimInf, LimSup, estiragem = Estir) = limites(LI, LS) :-

LI is LimInf / Estir, LI >= 1, LS is LimSup / Estir.

Comentário: computa LI como LimInf / Estir (deve ser >= 1) e LS como LimSup / Estir.

Entradas:

diagnostica_orgaos([Maqu|Resto], LimInf, LimSup, [X|Y]) :-

exiba([cor(10), \$Fluxo prod. = \$, [Maqu|Resto], cor(10), \$limites onda(cm) = \$,
LimInf:6:1, LimSup:7:1, nl]),
diagnostica_cada_orgao(Maqu, [X|Y]),
aguarde(\$Tecle algo para continuar...\$, _).

diagnostica_orgaos(Fluxo, LimInf, LimSup, []).

diagnostica_cada_orgao(CodMaqu, ListaOrgaos) :-

membro(NumId, ListaOrgaos),
retrieveh(maquinas, CodMaqu, orgao(NumId, Descr, Dim, RPM, ComprOnda)),
exiba([\$Num.Ident.: \$, NumId:2, \$ descr.: \$, Descr:27, \$ dimens.: \$, Dim, nl]),
fail; !.

Comentário: diagnostica_orgaos(+Fluxo, +LimInf, +LimSup, +ListaOrgaos): a primeira cláusula é utilizada quando ListaOrgaos é uma lista de órgãos suspeitos não-vazia. Neste caso, usa os três primeiros parâmetros para exibir um cabeçalho identificador, e chama diagnostica_cada_orgao(+CodMaqu, +ListaOrgaos), com CodMaqu, sendo código da máquina que encabeça a lista Fluxo para recuperar e exibir cada órgão membro da lista ListaOrgaos. A segunda cláusula do predicado nada faz: é chamada somente quando ListaOrgaos é uma lista vazia, e serve para que o predicado seja bem-sucedido em qualquer um dos casos.

Entradas:

qualificador(excesso(E)) = baixo :- E <= 0.5.

qualificador(excesso(E)) = alto :- E > 0.5.

qualificador(adequacao(A)) = baixo :- A =< 0.5, !.

qualificador(adequacao(A)) = medio :- A =< 0.75, !.

qualificador(adequacao(A)) = alto :- A > 0.75.

Comentário: estas regras associam um qualificador semântico (alto, médio ou baixo) a uma medida numérica de excesso e de adequação.

8.4.3 Regras da Base

Entrada:

regra01: se

 abre_arquivo(H) e

 todos diagnostica_series(H) e

 close(H)

entao

 diagnostico.

Comentário: abertura de um arquivo, diagnóstico de todas as séries de testes e fechamento do arquivo.

Entrada:

regra02: se

 le_serie(H) e

 codigo_maquina = CodMaqu e

 processo = Proc e

 comando(achar diagn_todas_irregul(CodMaqu,Proc)) e

 eraseall(serie) e expunge

entao

 diagnostica_series(H).

Comentário: le uma serie de testes, obtém o código da máquina da série, o processo, diagnostica todas as irregularidades da série apaga a série da memória.

Entrada:

regra03: se

```

    irregular(teste(T),padrao(P),excesso(E),adequacao(A),canal(C)) e
    exiba([$Cod.maquina: $,CodMaqu,$ - Processo: $,Proc,$ - teste: $,T,nl]) e
    exiba([cor(11),irregular(teste(T),padrao(P),excesso(E),adequacao(A),canal(C)),nl,nl]) e
    forma_onda(P) = F e
    exiba([cor(10),$Analise de irregularidades. Forma da onda: $,F,cor(10),
    $. Diagnostico: $,nl]) e
    diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = F,canal = C) e
    diagn_imprecisao(excesso(E),adequacao(A))

```

entao

```

    diagn_todas_irregul(CodMaqu,Proc).

```

Comentário: diagnostica_todas_irreg(+CodMaqu,+Proc) obtém os parâmetros de uma irregularidade registrada para um teste de uma série. A partir do número do padrão obtém sua descrição simbólica, diagnostica as irregularidades e as medidas de imprecisão. Exibe informações gerais.

Entrada:

regra04: se

```

    qualificador(excesso(E)) = Q1 e
    diagn_excesso(Q1) = D1 e
    exiba([cor(11),$Excesso sobre o espectrograma normal = $,E,nl,cor(10),
    D1,nl]) e
    qualificador(adequacao(A)) = Q2 e
    diagn_adequacao(Q2) = D2 e
    exiba([cor(11),$Adequacao para a irregular.detectada = $,A,nl,cor(10),D2,nl])

```

entao

```

    diagn_imprecisao(excesso(E),adequacao(A)).

```

Comentário: diagnostica as medidas de imprecisão excesso e adequação, procedendo da seguinte forma para cada medida: (i) acha o qualificador semântico de acordo com a medida, (ii) encontra o texto de diagnóstico e (iii) exibe-o.

Entrada:

regra05: se

```

    lista_maquinas_envolvidas(CodMaqu,Proc) = Lista e
    limites_onda_canal(C) = valores(LimInf,LimSup) e
    diagn(seno,excentrico) = D0 e
    exiba([cor(12),D0,nl]) e
    analise_orgaos(CodMaqu,Lista,caminho([]),limites(LimInf,LimSup)) e
    LI is 2*LimInf e LS is 2*LimSup e
    diagn(seno,ovalado) = D1 e
    exiba([nl,cor(12),D1,nl]) e
    analise_orgaos(CodMaqu,Lista,caminho([]),limites(LI,LS))

```

entao

```

    diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = seno,canal = C).

```

regra06: se

```

    maquina(CodMaqu) = filatorio e
    diagn(triangular,filat) = D0 e
    exiba([cor(12),D0,nl]) e
    diagn(triangular,trem) = D1 e
    exiba([nl,cor(12),D1,nl])

```

entao

```

    diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = triangular,canal = C).

```

regra07: se

```

    nao maquina(CodMaqu) = filatorio e
    diagn(triangular,trem) = D e
    exiba([cor(12),D,nl])

```


entao

diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = triangular,canal = C).

regra08: se

maquina(CodMaqu) = filatorio e

diagn('dente-de-serra',filat) = D0 e

exiba([cor(12),D0,nl]) e

diagn('dente-de-serra',trem) = D1 e

exiba([nl,cor(12),D1,nl])

entao

diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = 'dente-de-serra',canal = C).

regra09: se

nao maquina(CodMaqu) = filatorio e

diagn('dente-de-serra',trem) = D e

exiba([cor(12),D,nl])

entao

diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = 'dente-de-serra',canal = C).

regra10: se

maquina(CodMaqu) = filatorio e

diagn('impulsos + e -',filat) = D e

exiba([cor(12),D,nl])

ou

nao maquina(CodMaqu) = filatorio e

diagn(ausencia) = D e

exiba([cor(12),D,nl])

entao

diagn_irregul(CodMaqu,Proc,onda = 'impulsos + e -',canal = C).

regra11: se

```

maquina(CodMaqu) = filatorio e
diagn('impulsos +', filat) = D e
exiba([cor(12), D, nl])

```

ou

```

nao maquina(CodMaqu) = filatorio e
diagn(ausencia) = D e
exiba([cor(12), D, nl])

```

entao

```

diagn_irregul(CodMaqu, Proc, onda = 'impulsos +', canal = C).

```

regral2: se

```

lista_maquinas_envolvidas(CodMaqu, Proc) = Lista e
limites_onda_canal(C) = valores(LimInf, LimSup) e
diagn(estiragem, escart) = D0 e
exiba([cor(12), D0, nl]) e
analise_escart(CodMaqu, Lista, caminho([]), limites(LimInf, LimSup)) e
diagn(estiragem, trepid) = D1 e
exiba([nl, cor(12), D1, nl])

```

entao

```

diagn_irregul(CodMaqu, Proc, onda = estiragem, canal = C).

```

Comentário: `diagn_irregul(+CodMaqu, Proc, onda = +Classe, canal = +C)` constitui um grupo que cobre todas as ondas de irregularidades de acordo com o valor da instância **Classe**: o nome de uma das irregularidades. Para cada caso, um tratamento em particular para o diagnóstico da irregularidade é dado.

Entrada:

regral3: se

```

fator_escart(Maqu) = K e
maquina(CodMaqu) = Maqu e
ComprMedInf is LimInf/K e

```

ComprMedSup is LimSup/K e
 diagn_escart(entre(ComprMedInf,ComprMedSup),fluxo([CodMaqu|Poster])) e
 estiragem(CodMaqu) = Estir e
 limites_resto(LimInf,LimSup,estiragem = Estir) = limites(LI,LS) e
 todos analise_escart(_Resto,caminho([CodMaqu|Poster]),limites(LI,LS))

entao

analise_escart(CodMaqu,[Maqu|Resto],caminho(Poster),limites(LimInf,LimSup)).

Comentário: analisa a possibilidade da causa da estiragem ocorrer na seção de escartamento do trem de estiragem de alguma máquina, pesquisando a árvore de possibilidades das máquinas por onde o material possa ter sido processado, e se a onda pode ter sido gerada nas máquinas pesquisadas. A forma de como a busca recursiva ocorre é similar à efetuada pela regra16, e mais detalhada no respectivo comentário.

Entradas:

regra14: se

compr_fibra(min = Min,max = Max) e
 ComprMedInf =< Max e
 ComprMedSup >= Min e
 exiba([cor(10),\$Fluxo prod.= \$,F,cor(10),\$ compr.medio fibra(cm) entre\$,
 ComprMedInf:5:2,\$ e\$,ComprMedSup:5:2,nl])

entao

diagn_escart(entre(ComprMedInf,ComprMedSup),fluxo(F)).

regra15: diagn_escart(entre(ComprMedInf,ComprMedSup),fluxo(F)).

Comentário: chamado pela regra13, compara os comprimentos da medida inferior e superior do comprimentos de onda com os comprimentos limitantes mínimo e máximo de uma fibra, para determinar se possível causa de estiragem, e caso sucesso, exibe o resultado. Se a premissa da regra14 falha em alguma de suas proposições simples, a regra15 é usada para garantir o sucesso do predicado diagn_escart.

Entrada:

regal6: se

```

maquina(CodMaqu) = Maqu e
lista_organos_suspeitos(CodMaqu,LimInf,LimSup) = ListaOrgSusp e
diagnostica_organos([CodMaqu|Poster],LimInf,LimSup,ListaOrgSusp) e
estiragem(CodMaqu) = Estir e
limites_resto(LimInf,LimSup,estiragem = Estir) = limites(LI,LS) e
todos_analise_organos(_Resto,caminho([CodMaqu|Poster]),limites(LI,LS))

```

entao

```

analise_organos(CodMaqu,[Maqu|Resto],caminho(Poster),limites(LimInf, LimSup)).

```

Comentário: `analise_organos(?CodMaqu,+Lista,caminho([]),limites(+LimInf,+LimSup))`:

se `CodMaqu` está instanciado, confronta a máquina correspondente com a que encabeça a `Lista` - que deverão ser iguais, fornecendo assim solução possível única; senão instancia `CodMaqu` a um código de máquina com a que encabeça a `Lista` - soluções múltiplas obtidas por retrocesso. A seguir obtém então a lista de órgãos suspeitos, consultando a categoria `CodMaqu` da tabela hash máquinas, a qual é usada para relacionar o diagnóstico dos órgãos presentes na lista. Com auxílio da estiragem da máquina presente, calculam-se os limites de comprimento de onda da irregularidade para a entrada desta máquina (saída da máquina anterior) para possibilitar a continuidade da pesquisa mais para o estágio anterior. Procede daí recursivamente para as demais máquinas da lista, efetuando uma arborificação com descida vertical primeiro pela chamada recursiva da mesma meta com o resto da lista. A arborificação cessa quando `Lista` se esvazia. A primeira chamada à meta deve ser com `CodMaqu` instanciado (raiz da árvore), e as demais chamadas recursivas serão efetuadas com `CodMaqu` não instanciado, possibilitando instâncias múltiplas.

A busca exaustiva é efetuada porque na empresa-alvo não há como saber por quais máquinas específicas o material em processo passou. Todas as possibilidades combinatórias devem ser analisadas.

Eis um exemplo de busca: a meta estabelecida (para um processo penteado) é `demais_suspeitos(filaingo, [filatorio, macaroqueira, passadeira/2 ,..., carda], caminho([]), limites(2828.43,3249.00))` e a arborificação resultante, até o nível 3, é vista na figura 8-2.

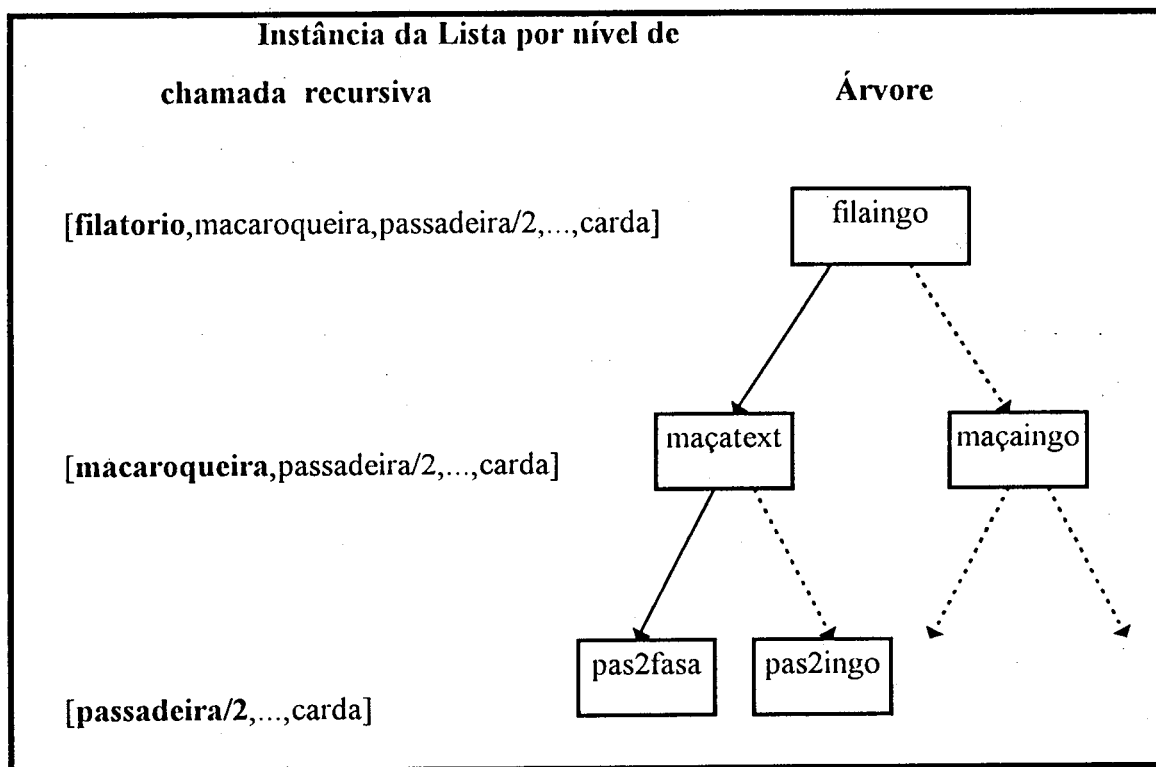


Figura 8-2. Busca em árvore desencadeado pelo predicado `analise_orgaos`

Entrada:

regra17: se

maquina(CodMaqu) = Maqu e

sequencia_processo(Proc) = ListaMaqu e

lista_demais(Maqu, ListaMaqu) = Lista

entao

lista_maquinas_envolvidas(CodMaqu, Proc) = Lista.

Comentário: fornecido o código da máquina `CodMaqu` e o processo `Proc`, a regra obtém o nome da máquina responsável por certa etapa dentro do processo, a lista completa de máquinas para todas as etapas do processo, e daí extrai a sublista da máquina atual até a `carda` - base de qualquer processo - retornando-a. Exemplo: `lista_maquinas_envolvidas[pas1fasa]` = Lista instancia Lista com [passadeira/1, penteadeira, laminadeira, reunideira, carda].

Entrada:

regral8: se

Meta e fail

ou

true

entao

todos Meta.

Comentário: todos +Meta recebe uma meta de pesquisa e procura satisfazer a mesma através de todas soluções possíveis. O predicado todos sucede quando nenhum retrocesso a mais é possível e Meta falha.

CAPÍTULO 9

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

9.1 Conclusões

A contribuição desta tese é exemplificada por sua aplicação a uma fiação têxtil. Além de proporcionar uma solução a um problema prático, ilustra um outro ponto importante: a aplicabilidade de conceitos inovadores, como os de redes neurais e sistemas especialistas. Muitas publicações relatam extensivo emprêgo bem-sucedido da tecnologia dos sistemas especialistas em diversas áreas de conhecimento,. Porém, a tecnologia das redes neurais ainda permanece mais como matéria de discussões acadêmicas. O interesse ideal no uso da tecnologia da neurocomputação está alicerçado no promissor benefício tecnológico advindo da sua implementação maciça em hardware. Embora um número grande de publicações e artigos relatando novos avanços nesta área seja uma realidade, por outro lado, a disponibilidade de chips comerciais ainda está por se concretizar.

Talvez a razão mais forte que tenha impedido o acompanhamento tecnológico a este novo paradigma tenha sido exatamente a indefinição de uma arquitetura implementável em hardware que atenda de maneira satisfatória a um número grande de modelos de redes. Outra razão pode ser mencionada: a emergência de tecnologias recentes, ainda em estado de desenvolvimento. Redes neurais necessitam computar e transmitir informações entre seus EP's. A atividade de computar é muito bem realizada por implementações em hardware eletrônico, mas, por outro lado, a atividade de transmitir informação não é tão facilmente implementada, pois boa parte da área do chip deve ser dedicada às conexões, restringindo o seu número máximo. As implementações em meios óticos surgem como uma alternativa para conectar EP's através de um feixe de luz. O mecanismo de sinapse pode ser realizado em sistema holográfico, através da exposição de um cristal fotorefratário ou uma superfície fotoreatora à luz. No entanto, esta tecnologia ainda se encontra em estado embrionário.

Não obstante, o sucesso animador demonstrado pelas simulações de redes neurais em software, como considerado especificamente para esta tese, levam a acreditar que, embora não se possa ainda desfrutar dos benefícios da verdadeira computação em paralelo, a modelo do que ocorre no sistema biológico humano, a neurocomputação já oferece soluções boas exatamente por partir de uma outra abordagem, totalmente diversificada da visão algorítmica tradicional: o emprego bem sucedido de métodos que retomam o comportamento do sistema nervoso, através de suas atividades aparentemente nada relacionadas a princípio com a estrutura em particular do problema a ser resolvido. Porém, de alguma forma o comportamento coletivo dos elementos de processamento consegue assimilar sua compreensão e oferecer soluções adequadas, mimetizando o fenômeno da aprendizagem e demonstra capacidade de sintetizar funções cerebrais elevadas, como as capacidades de abstração, generalização e robustez.

De modo similar, a tecnologia dos sistemas especialistas ainda necessita de mais algum fundamento. Embora muito esforço tenha sido dispendido para o desenvolvimento da engenharia do conhecimento, por certo os sistemas especialistas deixam ainda transparecer seu aspecto demasiado artificial. As interfaces de linguagem natural para o idioma Português são ainda demais limitadas devido às complexidades inerentes à gramática da língua, determinando assim restrições severas quando à capacidade de expressão numa linguagem controlada. Deste fato decorre um substancial afastamento entre as linguagens controladas - demasiadamente restritivas - e a linguagem natural. Em decorrência, a adequação do usuário às regras sintáticas da linguagem controlada torna-se mais difícil. Ao invés de facilitar sua interação com o sistema, a necessidade de expressão através de uma linguagem artificial que se afasta demasiadamente da natural pode ocasionar obstáculos à comunicação homem-máquina. Os resultados, nestes casos, podem ser piores do que na situação em que a interação era feita à base de menus e caixas de diálogo como nos sistemas convencionais, apesar da versatilidade iterativa mais limitada proporcionada por estes últimos recursos de comunicação. A compreensão de uma sentença expressa em linguagem controlada pressupõe, após sua bem sucedida análise sintática, uma análise semântica com o intuito de transladar esta para um comando ou uma meta coerente de acordo com a linguagem do sistema especialista, que deverá refletir corretamente o significado da sentença expressa pelo usuário. Mesmo admitindo seu sucesso, a dificuldade maior permanece no mapeamento inverso: a transformação do resultado para uma expressão em linguagem controlada similar à natural. A interação bilateral com o usuário e a facilidade de

explicação reivindicam a necessidade desta transformação. Normalmente, a transformação não é única, ocorrendo amiúde a possibilidade de expressar-se um resultado em diversas formas, numa linguagem natural ou mesmo controlada.

Embora longe do ideal, o atual sistema especialista consegue satisfatoriamente interagir com usuário, apesar de permitir um número restrito de operações. A linha-mestra durante uma sessão de consulta é determinada pelo sistema especialista desenvolvido, e não pelo usuário. A baixa flexibilidade desta implementação inicial baseia-se, em parte, na automatização dos procedimentos de teste e necessidade de adequação do usuário ao sistema.

9.2 Recomendações

A existência de regiões de sobreposição entre agrupamentos que contém picos significativos da mesma irregularidade é uma possibilidade ainda não resolvida. Desde que esta sobreposição pode ocorrer de acordo com um grande número de formas, não encontrada nenhuma solução que consiga separar e reconhecer estas manifestações no espectrograma. Sua apresentação visual torna-se freqüentemente confusa mesmo aos olhos de um especialista experiente. Embora se acredite ser rara a ocorrência desta manifestação, seria de interesse a existência de uma solução à este problema, visando a completude do sistema de detecção, muito embora seja questionável a importância prática de introduzir mecanismos auxiliares para o reconhecimento de tal manifestação atípica.

Na implementação desenvolvida, ao se constatar agrupamentos de irregularidades que não possam ser classificados como característicos de uma irregularidade singular conhecida, o sistema implementado procede por isolar seus picos mais significativos e interpreta-os como manifestações múltiplas de picos individuais representativos de ondas de irregularidade de natureza senoidal - uma outra possibilidade forte.

No estágio atual, o sistema especialista apenas qualifica de forma semântica as medidas de imprecisão e não efetua nenhum tratamento adicional de sua propagação. Uma contribuição significativa neste sentido seria determinar um método de como a imprecisão é afetada ao longo do processo. Esta consideração permitiria embutir alguma forma de tratamento de imprecisão dentro do sistema especialista.

Poderiam ser adicionadas metas ao sistema especialista para a realização de testes t de Student, com a finalidade de testar a significância da diferença entre máquinas ou entre lotes ou ainda para comparação com produtos competitivos, o que não foi ainda realizado. Seria uma forma de aproveitar o valor do coeficiente CV disponível.

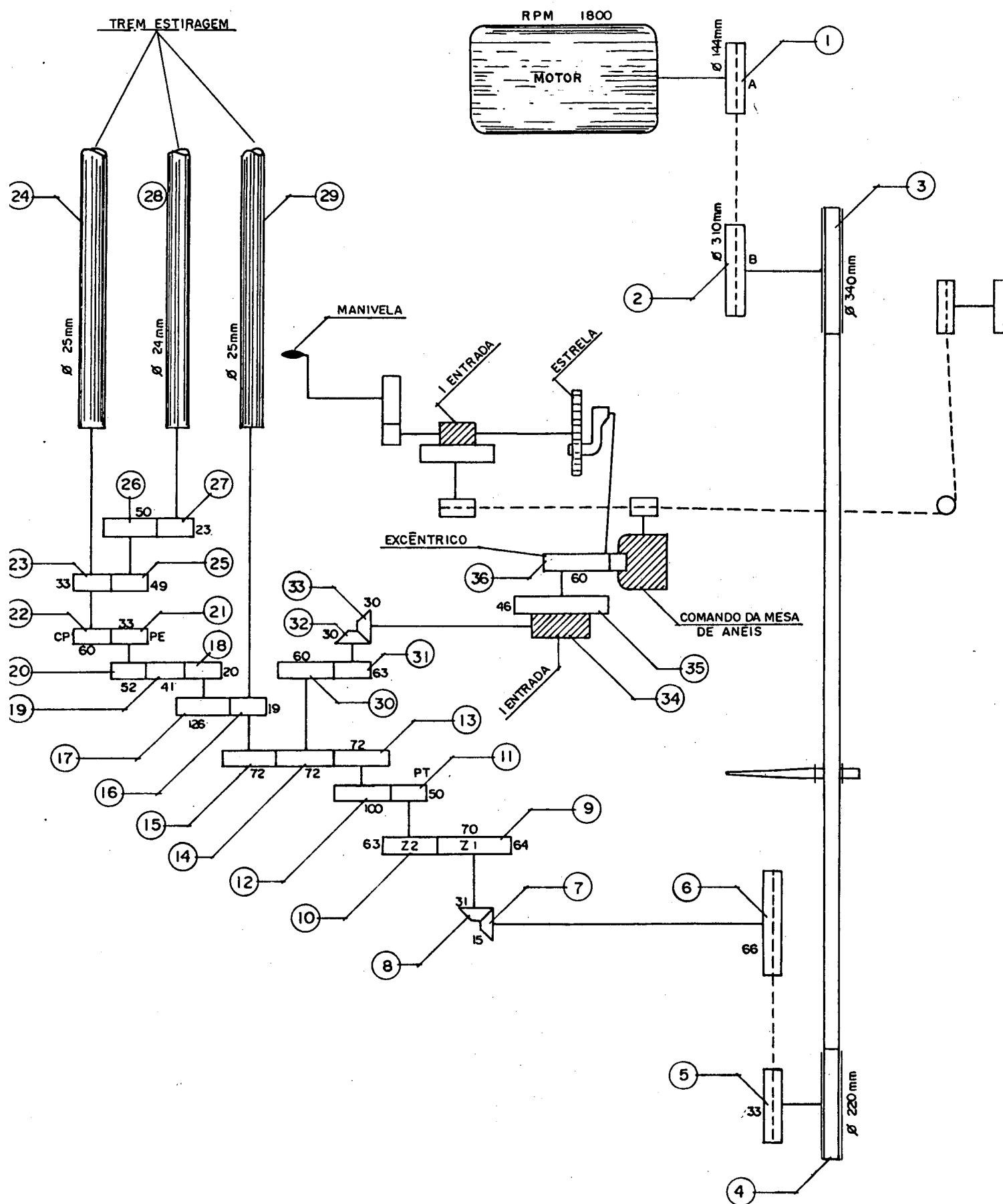
A fim de proporcionar um aperfeiçoamento nos futuros diagnósticos, é desejável o cadastramento dos resultados da ação de reparo, de forma que a causa da irregularidade constatada pela equipe de manutenção possa ser contrastada com o diagnóstico correspondente emitido pelo sistema. Este enriquecimento potencial pode suprir meios de eliminar incoerências e prover subsídios para um futuro tratamento estatístico da incerteza, pela estimação de probabilidades associadas às ocorrências. Ficaria desta forma aberto um canal para embutir um mecanismo de raciocínio/decisão Bayesiano. Adicionalmente, diagnósticos baseados em estudos de casos passados pode ser uma possibilidade de interesse.

A ampliação da base de conhecimentos necessita empregar esforços adicionais. Trata-se de uma tarefa bem orientada para um trabalho de equipe. Além da ampliação da base de conhecimentos, seria conveniente prover o sistema especialista com um interfaceamento mais amigável ao usuário, através da criação de uma linguagem controlada semelhante à linguagem natural, uso de janelas múltiplas e dispositivos apontadores.

Seria ainda desejável o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio na aquisição de conhecimentos. Durante a evolução dos Sistemas Especialistas, muito dispêndio de esforços foi dirigido para a aprendizagem ao desenvolvimento dos sistemas, procurando identificar estruturas básicas e caminhos para se criar um sistema especialista. Poucos resultados, entretanto, têm sido alcançados na obtenção de ambientes para a aquisição de conhecimento dentro de níveis de qualidade aceitáveis. As formas como pode ocorrer a transferência da capacidade de solucionar problemas a partir de diversas fontes - para programas de computador dão margem ao surgimento de características indesejáveis, que podem prejudicar a aceitação destes programas como instrumentos úteis à solução de problemas [PRA89].

Para bases de conhecimento que adquirem certo tamanho, as possibilidades de incorrer em enganos, inconsistências e redundâncias tornam-se acentuadas. Uma ferramenta que incorporasse, além da análise sintática de uma nova regra a ser adicionada à base, uma análise relativa aos aspectos acima mencionados seria de valia para futuras expansões da base de conhecimento.

ANEXO I - PLANO DE ÓRGÃOS DE UM FILATÓRIO



ANEXO II - SINTAXE DA LINGUAGEM SERP

Utilizam-se as regras de especificação BNF (Backus-Naur form) para especificar a sintaxe da linguagem SERP, com as seguintes convenções:

- palavras em minúsculo negrito (como em '**entao**') denotam operadores reservados da linguagem;
- palavras em maiúsculo (como em 'REGRA') denotam categorias sintáticas que usualmente são substituídas por construções válidas;
- a seta '→' interliga a categoria sintática à sua esquerda com o seu desdobramento sintático à direita, e expressa uma possibilidade válida de desdobramento sintático. A ocorrência repetitiva de categorias sintáticas à esquerda da seta, em mais linhas, denota formas alternativas válidas;
- símbolos tipográficos básicos, como letras e numerais estão representados em minúsculo itálico. Separação de símbolos válidos⁷ para uma categoria de símbolos é feita com a barra inclinada '/'. Uma categoria sintática declarada entre chaves simboliza uma sequência de 0 ou mais símbolos tipográficos da categoria.

Descrição Sintática de SERP.

BASE_DE_CONHECIMENTOS → ENTRADA. BASE_DE_CONHECIMENTOS

ENTRADA → METAFATO

ENTRADA → REGRA

ENTRADA → FATO

METAFATO → **questao**(TERMO) = TEXTO

METAFATO → **vslegais**(TERMO) = LISTA

METAFATO → **vslegais**(TERMO) = **inteiro**(INTEIRO,INTEIRO)

METAFATO → **vslegais**(TERMO) = **real**(NUMERO,NUMERO)

⁷Outra forma de representar alternativas sintáticas, numa só linha.

METAFATO → multivaluado(TERMO)
METAFATO → **explicacao**(ROTULO) = TEXTO
METAFATO → **cache**(PROPOSICAO_SIMPLES)
METAFATO → **inicializa** = LISTA
METAFATO → **meta** = PROPOSICAO_SIMPLES
METAFATO → **prefixo** = OPERADOR
METAFATO → **entrefixo** = OPERADOR
METAFATO → **sufixo** = OPERADOR
REGRA → ROTULO: **se** PREMISA **entao** CONCLUSAO
FATO → ROTULO: PROPOSICAO_SIMPLES
TEXTO → STRING
NUMERO → INTEIRO
NUMERO → REAL
ROTULO → ATOMO
PREMISSA → PROPOSICAO
CONCLUSAO → PROPOSICAO_SIMPLES
PROPOSICAO → PROPOSICAO_SIMPLES
PROPOSICAO → **nao** PROPOSICAO
PROPOSICAO → PROPOSICAO **e** PROPOSICAO
PROPOSICAO → PROPOSICAO **ou** PROPOSICAO
PROPOSICAO → (PROPOSICAO)
PROPOSICAO_SIMPLES → TERMO
PROPOSICAO_SIMPLES → ATRIBUTO = VALOR
ATRIBUTO → TERMO
VALOR → TERMO
TERMO → VARIABEL
TERMO → ATOMICO
TERMO → ESTRUTURA
ATOMICO → ATOMO
ATOMICO → INTEIRO
ATOMICO → STRING
ATOMICO → REAL
ATOMO → ATOMO_NAO_COTADO

ATOMO → ATOMO_COTADO
 ESTRUTURA → ESTRUTURA_PARENTETICA
 ESTRUTURA → LISTA
 ESTRUTURA → ESTRUTURA_OPERADOR
 ESTRUTURA_PARENTETICA → FUNCTOR(SEQUENCIA_DE_ARGUMENTOS)
 FUNCTOR → TERMO
 SEQUENCIA_DE_ARGUMENTOS → TERMO
 SEQUENCIA_DE_ARGUMENTOS → TERMO, SEQUENCIA_DE_ARGUMENTOS
 LISTA → []
 LISTA → '.'(TERMO, LISTA)
 LISTA → [SEQUENCIA_DE_TERMOS]
 LISTA → [SEQUENCIA_DE_TERMOS | LISTA]
 LISTA → [SEQUENCIA_DE_TERMOS | VARIÁVEL]
 LISTA → "CARACTERES_ASCII"
 ESTRUTURA_OPERADOR → OPERADOR TERMO
 ESTRUTURA_OPERADOR → TERMO OPERADOR TERMO
 ESTRUTURA_OPERADOR → TERMO OPERADOR
 ATOMO_COTADO → 'CARACTERES_ASCII'
 ATOMO_NAO_COTADO → LETRA_MINUSCULA{CARACTER_ATOMO}
 VARIÁVEL → LETRA_MAIÚSCULA{CARACTER_ATOMO}
 CARACTER_ATOMO → LETRA_MINÚSCULA
 CARACTER_ATOMO → LETRA_MAIÚSCULA
 CARACTER_ATOMO → NUMERAL
 LETRA_MINÚSCULA → a/b/c/d/e/f/g/h/i/j/k/l/m/n/o/p/q/r/s/t/u/v/w/x/y/z
 LETRA_MAIÚSCULA → A/B/C/D/E/F/G/H/I/J/K/L/M/N/O/P/Q/R/S/T/U/V/W/X/Y/Z/_
 NUMERAL → 0/1/2/3/4/5/6/7/8/9

ANEXO III - TABELA DE OPERADORES SERP

| Precedência | Símbolo operador | Associati- vidade | Significado |
|-------------|------------------|----------------------|--|
| 210 | <usuário> | fy | definido pelo usuário |
| 220 | <usuário> | yf | definido pelo usuário |
| 230 | <usuário> | xfy | definido pelo usuário |
| 300 | ^ | xfy | potenciação |
| 400 | *, / | yfx | produto, divisão |
| 400 | //, mod | yfx | divisão inteira: quociente, resto |
| 500 | +, - | fx | unário positivo, negativo |
| 500 | +, - | yfx | adição, subtração |
| 500 | <, =< | xfx | desigualdade menor, menor-ou igual |
| 600 | >, >= | xfx | desigualdade maior |
| 600 | :=, \= | xfx | igualdade, diferença de expressões |
| 650 | =.. | xfx | estrutura para lista e vice-versa |
| 700 | ==, \== | xfx | valores equivalentes, não-equivalentes |
| 700 | @<, @=< | xfx | precede estritamente, precede |
| 700 | @>, @>= | xfx | sucede estritamente, sucede |
| 700 | = | xfx | relação entre atributo e valor |
| 700 | \= | xfy | falha se operandos unificam |
| 700 | is | xfx | força avaliação de expressão numérica com unificação |
| 780 | nao | fy | negação SERP |
| 790 | e | yfx | conjunção SERP |
| 800 | ou | yfx | disjunção SERP |
| 810 | entao | xfx | liga premissa a conclusão |
| 820 | se | fx | precede premissa |
| 830 | : | xfx | interliga rótulo ao fato ou regra |
| 900 | not | fy | negação de metas Prolog |
| 930 | (1) | fx | predicados de comando SERP |
| 940 | (2) | fx | predicados de comando SERP |
| 1000 | , | xfy | conjunção de metas Prolog |
| 1100 | ; | xfx | disjunção de metas Prolog |
| 1200 | --> | xfx | gramáticas de livre contexto |
| 1200 | :- | xfx | condicional Prolog |

(1) base / cache / prolog

(2) achar / ajuda / ajustar / dir / editar / janela / ler / salvar / limpar / listar

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [BAL90] BALLEY, David; THOMPSON, Donna. How to develop neural networks applications. AI Expert, v. 7, june 1990.
- [BRI88] BRIGHAM, E. Oran. The fast Fourier transform and its applications. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1988.
- [BUC70] BUHLER, M. Some commom faults in cotton spinning. Swiss : Zellweger Uster, 1970.
- [CAR80] CARMINATI, Carlo. La filatone di cotone: guida completa ad uso dei dirigenti e tecnici. Milão : Ulrico Hoepli, 1980.
- [CUL43] MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. H. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, v. 5, p. 115-133, 1943.
- [CUN92] CUNHA, Idaulo J. O salto da indústria catarinense: um exemplo para o Brasil. Florianópolis : Paralelo 27, 1992.
- [FEI81] FEIGENBAUM, Edward; BARR, Avrom. The hanbook of artificial intelligence. [S.l.] : Heuristech, 1981.
- [GIB73] GIBRA, Isaac N. Probability and statistical inference for scientists and engineers. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1973.
- [GRA74] GRAF, U.; HENNING, P. T. Wilrich. Statistische Methoden bei textilen Untersuchungen. Berlin : Springer Verlag, 1974.
- [HAT73] HATTENSCHWILER, M. Bühler. Frequënt faults in cotton spinning. [S.l.] : Melliland Textilberichte, 1973.
- [HAT75] _____. Faults in worsted and woolenspinning. [S.l.] : Melliand Textilberichte, 1975.
- [HAY83] HAYES-ROTH, Frederick; WATTERMAN, Donald A.; LENAT, D. B. et al. Building expert systems. Reading : Addison-Wesley, 1983.
- [HEB49] HEBB, D. O. The Organization of Behavior. NewYork : John Wiley & Sons, 1949.
- [HER87] HERING, Maria L. R. Colonização e indústria do Vale do Itajaí: o modelo catari-

nense de desenvolvimento. Blumenau : FURB, 1987.

- [HOF73] HOFFMANN, D. The determination of the coefficient of variation by means of an electronic instrument. Journal of the Textile Institute, v. 64, n. 7, July 1973.
- [HOP82] HOPFIELD, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proceedings of the National Academy of Science. v. 79, p. 2554-2558, Apr. 1982.
- [LAG90] LAGO, Paulo F. O império dos Hering. Revista Expressão, Florianópolis, v. 1, n. 5, p.36-39, ago. 1990.
- [LIP87] LIPPMAN, R.P.; GOLD, B.; MALPASS, M. L. A comparison of Hamming and Hopfield neural nets for pattern classification: MIT Lincoln Lab. Tech. Report 769. Lexington, May 1987.
- [MAS93] MASTERS, Timothy. Practical neural networks recipes in C++. San Diego : Academic, 1993.
- [MIN69] MINSKY, M. L.; PAPERT, S. Perceptrons. Cambridge : MIT, 1969.
- [PAO89] PAO, Yoh-Han. Adaptive pattern recognition and neural networks. Reading : Addison-Wesley, 1989.
- [PAR90] PARANTHAMAN, D. Controle da qualidade. São Paulo : McGraw-Hill, 1990.
- [PET91] PETTINI, Fábio. Programação orientada para objetos: fundamentos e aplicações. São Paulo, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo.
- [PRA89] PRADO, Hércules A.; PINHO, Antônio de A. Validação de bases de conhecimento em sistemas especialistas baseados em regras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL DA UFRJ, 1989. Rio de Janeiro. Anais ... Rio de Janeiro, 1989. p. 114-133.
- [RET84] RETOUR, D. Les systèmes experts aux États-Unis. Grenoble : Institut d'Études Commerciales, 1984.
- [ROS59] ROSENBLATT, F. Principles of neurodynamics. New York : Spartan Books, 1959.
- [RUM86] RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning internal representations by error propagation. Parallel Distributed Processing, Cambridge, v. 1, p. 318-362, 1986.
- [STY94] STYLIOS, G.; SOTOMI, O. J. A neuro-fuzzy control system for intelligent sewing

- machines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS ENGINEERING, 2, 1994. Hamburg-Harburg. *Anais ...* London, British Comp. Soc., 1994. p. 241-246.
- [THO90] THORPE, P.; RUSHTON, A. An expert system for fault diagnosis in fibre production. In: ADVANCES IN REABILITY TECHNOLOGY SYMPOSIUM, 1990. Liverpool. *Anais ...* Elsevier Applied Science, 1990. p. 337-346.
- [UST78] APPLICATION handbook: Uster evenness testing. Swiss : Zeliweger Uster, 1978.
- [UST81] APPLICATION handbook: for evenness testing. Swiss : Zeliweger Uster, 1981.
- [UST89] LA TERCERA geración de regularímetros Uster. Swiss : Zeliweger Uster, 1989.
- [VAC94] VACHTSEVANOS, G. J.; DORRITY, J. L.; KUMAR, A.; SUNGSHIN Kim. Application of statistical and fuzzy control to textile processes. IEEE Trans. Ind. Appl. Atlanta, v. 30, n. 3, p. 510-516.
- [WAT86] WATTERMAN, Donald A. A guide to expert systems. Reading : Addison-Wesley, 1986.
- [WID60] WIDROW, B.; HOFF, M. E. Adaptative switching circuits. In: WESTERN ELECTRONIC SHOW AND CONVENTION, 1960. *Anais* LOCAL, Institute of Radio Engineers, 1960. p. 96-104.
- [WU_94] WU, P.; FANG, S.-C.; NUTTLE, H. L. W.; KING, R. E.; WILSON, J. R. Decision surface modeling of textile spinning operations using neural network technology. Raleigh : North Carolina State University, 1994.